



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO TUOMISTO
SUKLAA 3D-TULOSTUSMATERIAALINA SEKÄ TULOSTUSPÄÄN
SUUNNITTELU SUKLAAN PURSOTUKSEEN

Kandidaatintyö

Tarkastaja: TkL Jorma Vihinen

TIIVISTELMÄ

Mikko Tuomisto: Suklaa 3D-tulostusmateriaalina sekä tulostuspään suunnittelu suklaan pursotukseen
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 54 sivua
Marraskuu 2018
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma
Pääaine: Integroitu tuotekehitys ja tuotanto
Tarkastaja: TkL Jorma Vihinen

Avainsanat: 3D-tulostus, tulostinpäät, suklaa, elintarvikeala, lisäävä valmistus, pursotusmenetelmä, pumpput

Kaupallisten suklaata tulostavien 3D-tulostimien määrä on lisääntynyt viime vuosina. Työssä tutkitaan suklaata 3D-tulostusmateriaalina sekä tulostinpään suunnitteluun vaikuttavia seikkoja.

Suklaan sisältämä kaakaovoi on polymorfinen aine, jossa esiintyy yleisen käsityksen mukaan 6 eri kidemuotoa. Näistä kidemuodoista tavoiteltu suklaan valmistuksessa on kidemuoto V tai toiselta merkintätavaltaan β_2 , joka antaa suklaalle parhaimman kiillon, rapean suutuntuman sekä hyvän sulamislämpötilan ja säilyvyyden. Suklaata temperoidaan, jotta suklaaseen saataisiin muodostuttua V muotoisia kiteitä ja jotta sen työstettävyyttä parantuisi. Suklaan temperointi asettaa kuitenkin haasteita lisäävässä valmistuksessa pursotusmenetelmällä. Haasteena on muun muassa temperoidun suklaan viskositeetin kasvaminen ajan funktiona. Suklaan temperointi voi myös itsessään olla kokemattomalle käyttäjälle liian hankalaa. Suklaata tulostaviin 3D-tulostimiin olisi siis tärkeää suunnitella automaattisia temperointitoimintoja sekä tapoja hallita viskositeettia.

Suklaata 3D-tulostaessa syytä on myös tuntee muut suklaan viskositeettiin vaikuttavat seikat, kuten suklaan koostumus ja kaakaovoin alkuperä. Suklaa on tiksotrooppinen neste, jonka viskositeetti alenee leikkausnopeuden kasvaessa tiettyynajaan saakka.

Työssä arvioidaan erilaisia pumppuvaihtoehtoja, jota voisi soveltaa suklaata tulostavaan tulostuspäähän. Työn yhteenvedossa esitellään konsepti jatkuvatoimivasta temperoitua suklaata pursottavasta tulostuspäästä soveltamalla hammasratas- tai lohkoroottoripumppua. Työssä ehdotetaan 3D-tulostimen kinemaattiseksi ratkaisuksi käänteistä Delta-robotti rakennetta, joka mahdollistaa tulostinpään paikallaan olemisen. Tulostusalustan sijoittamista ehdotetaan myös suljetuun tulostuskammioon, jotta kappale jäähtyisi tasaisemmin. Työssä puhutaan myös elintarvikekelpoisista kontaktimateriaaleista, joista erityisesti ruostumaton teräs sekä POM C-muovi todetaan olevan hyviä vaihtoehtoja tulostuspään rakennuksessa.

ABSTRACT

Mikko Tuomisto: Chocolate as 3D-printing material and designing of a print head for chocolate extrusion

Tampere University of Technology

Bachelor of Science Thesis, 54 pages

November 2018

Bachelor's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Intergrated Product Development and Production

Examiner: Tech.Lic. Jorma Vihinen

Keywords: 3D-printing, print heads, chocolate, foodstuff, additive manufacturing, hot-melt extrusion, fused deposition modelling, pumps,

The amount of commercial chocolate 3D-printers has increased in recent years. This paper discusses chocolate as 3D-printing material and factors relating to the design of a chocolate print head.

Cocoa butter is a polymorphic substance which is generally assumed to have 6 different crystalline forms. Crystalline form V or by another name β_2 is pursued in chocolate making because it gives chocolate proper shine, good snap and melting properties and best shelf-life. Chocolate is tempered to form a uniform V crystal structure upon solidification and to improve its workability. Tempered chocolate, however, causes problems in 3D-printing because it's viscosity increases with time. Also, tempering chocolate can prove a challenge to unexperienced users of the machine. Thus, it is important to design automatic tempering features to 3D-printers and ways to control viscosity.

When printing in chocolate it is important to know also other factors influencing the viscosity of chocolate such as ingredients and origin of the cocoa butter. Chocolate is a thixotropic non-Newtonian fluid which viscosity decreases with increasing shear-rate to a certain point.

In the paper different kinds of pumps suitable for chocolate print heads are assessed. In the summary a concept about a continuous tempering print head is presented adapting external gear pump and lobe pump. Also, as kinematic solution inverse Delta-robot structure is suggested to allow the print head to remain fixed in place. The 3D-printer is suggested to have an enclosed printing chamber to help with even cooling of the product. Suitable contact materials for construction of chocolate print head are assessed to be polyacetal and stainless steel.

ALKUSANAT

Kiinnostukseni suklaan 3D-tulostukseen syntyi vuonna 2016, kun rakensimme ammat-
tiainekerho Pullonkaulassa projektityönä 3D-suklaatulostimen. Kävimme suklaatulosti-
men kanssa Helsingin Gastro-messuilla ravintolakoulu Perhon messuosastolla, minkä
kautta syntyi yhteys Fazeriin. Päädyimme rakentamaan myös Fazerin vierailukeskukseen
3D-suklaatulostimen.

Kiitän yhteistyöstä 3D-tulostimen rakentamisessa projektin vetäjää Andres Lorvia ja Max
Angelmaa.

Tampereella, 8.11.2018

Mikko Tuomisto

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SUKLAA 3D-TULOSTUSMATERIAALINA	3
2.1	Suklaan ainesosat	3
2.2	Kaakaovoin merkitys.....	5
2.2.1	Kaakaovoin polymorfia.....	5
2.2.2	Kaakaovoin koostumus	7
2.2.3	Kiteytyminen.....	8
2.2.4	Temperointimenetelmät	9
2.3	Suklaan harmaantuminen, jäähditys ja säilytys.....	12
2.4	Suklaan reologia.....	14
2.4.1	Kaakaon kiintoaineiden vaikutus suklaan reologiaan.....	14
2.4.2	Kaakaovoin vaikutus reologiaan.....	15
2.4.3	Muiden ainesosien vaikutus reologiaan	16
2.4.4	Reologisten ominaisuuksien määrittäminen.....	17
2.5	Yhteenveto suklaasta 3D-tulostusmateriaalina	18
3.	TULOSTUSPÄÄN SUUNNITTELU.....	20
3.1	Vertailu 3D-suklaatulostimista.....	20
3.2	Patenttitutkimus.....	25
3.3	Pumppuvaihtoehdot.....	28
3.3.1	Askelmoottorikäyttöinen ruiskupumppu.....	28
3.3.2	Pneumaattinen ruiskupumppu.....	31
3.3.3	Ruuvi- ja epäkeskoruuvipumput	32
3.3.4	Hammaspyörä- sekä lohkoruotripumput.....	33
3.3.5	Peristalttinen pumppu	35
3.4	Syöttömoottorin takaisinkytkennän edut.....	36
3.5	Lämmitys ja jäähditys	36
3.6	3D-tulostimen kinematiikan merkitys	39
3.7	Materiaalit	41
4.	PARAMETRIT	44
5.	YHTEENVETO	45
	LÄHTEET	49

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Eri tummia suklaita, joilla kaikilla on sama kaakaopitoisuus (73%). Ainesosat - kaakaomassa, kaakaovoi ja sokeri - eroteltu eri osuuksiksi. (Albert Uster Imports, Notter 2011 mukaan, s. 13)</i>	<i>4</i>
Kuva 2.	<i>Vertailu eri maissa tuotetun kaakaovoin fysikaalisesta pehmeystä. Arvot Loders Croklaan mukaan. (katso Beckett et al. 2009, s. 420)</i>	<i>8</i>
Kuva 3.	<i>Suklaan temperointi pöydällä. (Notter 2011, s. 47)</i>	<i>10</i>
Kuva 4.	<i>Tumman Callebaut 811 suklaapakkauksen takaa löytyy temperointikäyrä. (mukaillen GIUNTI al Punto, verkkosivu)</i>	<i>11</i>
Kuva 5.	<i>Pöytätasolle mahtuva temperointikone. (mukaillen Chocovision, verkkosivu)</i>	<i>11</i>
Kuva 6.	<i>Pullonkaulan 3D-suklaatulostimella tulostettuja kappaleita, jotka ovat menneet pilalle joko nopeasti (vasemmalla) tai ajan saatossa (oikealla)</i>	<i>12</i>
Kuva 7.	<i>Päälystyskoneen tuottama viallinen kappale. Vika on aiheutunut suklaan liian suuresta viskositeetista. (Beckett et al. 2009, s. 255)</i>	<i>14</i>
Kuva 8.	<i>Suklaan viskositeetti ja leikkausvoima esitetty leikkausnopeuden mukaan menetelmän Analytical Method 46 mukaisesti. (mukaillen Do et al., katso Wolf 2011, s. 3)</i>	<i>18</i>
Kuva 9.	<i>Miam Factory yrityksen valmistamia suklaatulosteita. (mukaillen Miam Factory, verkkosivu)</i>	<i>22</i>
Kuva 10.	<i>Hans Fouchen suklaata tulostava 8-päinen Cheetah 2D-tulostin. (3ders, verkkosivu)</i>	<i>24</i>
Kuva 11.	<i>Pullonkaulan 3D-suklaatulostin.</i>	<i>24</i>
Kuva 12.	<i>Porimyn patentoima kappaleen automaattinen poistaminen sekä suppilon vesijäähdytys. (Wang et al. 2017)</i>	<i>25</i>
Kuva 13.	<i>Xeroxin patentoimassa menetelmässä suklaa voidaan säilöä sulana (26) ja alemmat kerrokset (22) voivat toimia siemenkiteinä päällimmäiselle kerrokselle (33). Lämmitettyä tai jäähdytettävää alustaa (10) voidaan hyödyntää pohjakerroksen (12) temperoinnissa. (Mantell et al. 2014)</i>	<i>26</i>
Kuva 14.	<i>Stratasyksen patentissa esitelty paluulinja (48) tulostuspäästä (26) lämmittimen (28) kautta suklaasäiliöön (22). (Zimmerman et al. 2012)</i>	<i>27</i>
Kuva 15.	<i>Pullonkaulan 3D-suklaatulostimen tulostinpää on painava. Massa täytetyn ruiskun kanssa on noin 1.700kg</i>	<i>29</i>
Kuva 16.	<i>Ultimaker tulostimen suunniteltu Discov3ry tulostinpää. Ruiskupumppu on tilan säästämiseksi ja tulostinpään keventämiseksi sijoitettu erilleen tulostinpäästä. (Structur3D Printing, verkkosivu)</i>	<i>30</i>

Kuva 17.	<i>VTT:n ruoan 3D-tulostuksen tutkimiseen käyttämä testilaitteisto. (mukaillen Sözer 2017).....</i>	<i>31</i>
Kuva 18.	<i>Verbruggenin suunnittelema epäkeskoruuvipumppuun perustuva tulostuspää. (mukaillen Verbruggen 2014).....</i>	<i>33</i>
Kuva 19.	<i>Vasemmalta oikealle: sisäryntöinen hammaspyöräpumppu, gerotor-pumppu, ulkoryntöinen hammaspyöräpumppu. (Hydraulics & Pneumatics, verkkosivu).....</i>	<i>34</i>
Kuva 20.	<i>Erilaisia lohkoroottoripumpun roottoriprofiileja. (mukaillen Nesbitt 2006, s. 37).....</i>	<i>34</i>
Kuva 21.	<i>Tavallisen letkupumpun toiminta perustuu joustavaan letkuun sekä letkua vasten painautuviin rulliin. (Manufacturing Chemist, verkkosivu).....</i>	<i>35</i>
Kuva 22.	<i>Tulostinpään lämmitykseen soveltuvia vastuksia. Vasemmalla 50W lämmitysnauha, oikealla 40W keraaminen vastus. (Alper, verkkosivu; E3D-Online.com, verkkosivu).....</i>	<i>37</i>
Kuva 23.	<i>Peltier-elementti. (Farnell, verkkosivu)</i>	<i>37</i>
Kuva 24.	<i>Jäähdytetty tulostusalusta aiheutti Pullonkaulan 3D-suklaatulostimella kappaleiden taipumista sekä irtoamista tulostusalustasta.</i>	<i>38</i>
Kuva 25.	<i>3Drag 3D-suklaatulostimen jäähdytysjärjestelmä. (Landoni 2015, verkkosivu).....</i>	<i>39</i>
Kuva 26.	<i>3D PotterBot Clay 3D Printer. (Rich, 2015).....</i>	<i>40</i>
Kuva 27.	<i>Konsepti hammasrataspumppuun perustuvasta tulostuspäästä.....</i>	<i>46</i>
Kuva 28.	<i>Konsepti lohkoroottoripumppuun perustuvasta tulostuspäästä. Kuvassa havainnollistettu jatkuvatoiminen temperoidun suklaan tulostaminen.</i>	<i>47</i>
Kuva 29.	<i>Lohkoroottoripumpulla suklaan temperointi. Vaatimuksena on, että lohkoja pystyy ajamaan erikseen.....</i>	<i>47</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FDM	Fused Deposition Modeling.
FFF	Fused Filament Fabrication
FCIA	Fine Chocolate Industry Association
EU	Euroopan unioni
PLA	Polylaktidi
ABS	Akryylnitriilibutadieenistyreeni
POM C	Polyasetaali
Delta-robotti	Eräänlainen rinnakkaisrakenteinen robotti, jossa kolme raajaa liikuttaa työkalua.
DSC	Differential Scanning Calorimetry
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
PGPR	Polyglyserolipolyrisiiniioleaatti
IOCCC	International Office of Cocoa, Chocolate and Sugar Confectionery
PWM	Pulse-Width Modulation

1. JOHDANTO

Kymmenen viime vuoden aikana ainetta lisäävä valmistus eli puhekielessä 3D-tulostus on hakenut jalansijaa myös elintarviketeollisuudesta. Ruoan valmistusmenetelmänä 3D-tulostus on yleensä hidas, mutta se mahdollistaa muun muassa monimutkaisten muotojen tekemisen sekä hyvän toistettavuuden, mikä käsin koristellessa olisi haastavaa tai mahdotonta. Ruokien muotoa voidaan myös nopeasti ja edullisesti muokata asiakkaiden toiveiden mukaisesti esimerkiksi lahjoja varten tai juhlasesonkien mukaan. 3D-tulostamalla voidaan mahdollisesti vaikuttaa myös ruoan suutuntumaan ja väriin. Ruoan 3D-tulostuksen potentiaalisia hyötyjä ollaan erityisesti perusteltu sillä, että ruoan määrää sekä ravintoarvoja pystytään tarkasti annostelemaan. 3D-tulostettu ruoka voisi siis olla keino terveellisempään, ihmiselle räätälöityyn ruokavalioon. (Sun *et al.* 2015; Liu *et al.* 2017)

Ruoan 3D-tulostukseen on sovellettu erilaisia lisäävän valmistuksen menetelmiä. Sokeria on liitetty yhteen 3D-kappaleiksi sekä jauhepetisulatusta (CandyFab 6000, TNO) että sidosaineita (Chefjet) käyttäen. Foodjet perustuu taas materiaalin, esimerkiksi suklaan tai tomaattimurskeen, suihkutukseen. Materiaalin pursotukseen perustuvia kaupallisia 3D-ruokatulostimia on julkaistu eri valmistajilta jo lukuisia. Näitä ovat esimerkiksi Foodini, Bocusini ja Focus 3D. (Sun *et al.* 2015; Liu *et al.* 2017)

Pursottamalla voidaan tulostaa erilaisia pehmeitä ruoka-aineita. Esimerkiksi taikinaa, prosessoitua juustoa tai erilaisia liivateseoksia voidaan tulostaa pursottamalla huoneen lämmössä ilman tulostuspään lämmitystä. Tulostetun kappaleen rakenne pysyy kasassa tällöin aineen reologisten ominaisuuksien tai liivatteen verkkosidosten avulla. Kevyellä tulostuspään lämmityksellä voidaan tulostaa myös ruoka-aineita, jotka olisivat muuten kiinteitä huoneenlämmössä, kuten esimerkiksi suklaata. Materiaali on silloin sulassa muodossa tullessaan ulos suuttimesta, jonka jälkeen se jäähtyy kiinteäksi osaksi tulostettavaa kappaletta. (Sun *et al.* 2015)

Työssä tarkastellaan suklaan pursotusta lämmitetyllä tulostuspäällä (engl. hot-melt extrusion). Moni ruokatulostinvalmistaja markkinoi harhaanjohtavasti suklaan käytön mahdollisuudella 3D-tulostimiaan. Jos kyseisessä 3D-tulostimessa ei ole lämmitettyä tulostuspäätä, mainostettu suklaa on todennäköisesti Nutellan tapainen suklaalevite tai kerman ja suklaan sekoitus eli ganache, joka pysyy riittävän juoksevana huoneen lämmössä.

Aidon 3D-suklaatulostimen on ensimmäisenä kaupallistanut englantilainen Choc Edge vuonna 2012 Choc Creator V1 -tulostimellaan. Tämän jälkeen on nähty myös lukuisia muita varta vasten suklaan 3D-tulostukseen suunniteltuja 3D-tulostimia, joista työssä on

myöhemmin vertailu. Yhtenä maineikkaimpana voidaan pitää 3D Systemsin ja amerikkalaisen suklaavalmistajan Hersheyn yhteistyössä tekemää Cocomet nimistä 3D-tulostinta, jota ei ole kuitenkaan vielä julkaistu markkinoille. Huomiota on saanut myös belgialainen yritys Miam Factory, joka on 3D-tulostanut erityisen näyttäviä koriste-esineitä suklaasta omalla 3D-tulostimellaan. Miam Factory käyttää oletettavasti 3D-suklaatulostimessaan 3DPrintin suklaatulostuspäätä, joka on ostettavissa Open Electronicsin verkkosivuilta.

Maailmanlaajuisesti suklaan ympärillä pyörivät valtavat yli 100 miljardin dollarin markkinat (Grand View Research 2018). Perinteisessä liiketoimintamallissa suklaatehtaissa tehtävät tuotteet kuljetetaan jälleenmyyjille kauppoihin, joista tuotteet myydään kuluttajille. Suklaatuotteiden valmistuserät ovat suuria, sillä tehtaan prosessien muuttaminen on kallista (Beckett *et al.* 2009, s. 459). Tuotanto perustuu varasto-ohjaukseen, eli tuotteita tehdään varastoon arvioidun kysynnän mukaan (engl. make-to-stock). (Jia *et al.* 2016)

Jia *et al.* (2016) tekivät simulaation suklaan 3D-tulostuksen mahdollisista vaikutuksista perinteiseen liiketoimintamalliin. Simulaatio perustui Choc Edgen pyrkimyksiin suklaan 3D-tulostuksen kaupallistamiseksi. Julkaisussa todetaan, että suklaan 3D-tulostus muuttaa suklaan tuotannon tilausohjaukseksi (engl. make-to-order). 3D-tulostamalla erinäköisiä tuotteita voidaan tehdä tilauksien perusteella ja ainoastaan raaka-aine, suklaarouhe, tarvitaan varastoon. Simulaatiossa vertailtiin kahta eri mallia: Toisessa suklaanvalmistajat ovat ottaneet käyttöön 3D-tulostuksen - toisessa jälleenmyyjät. Molemmissa räätälöityjen suklaatuotteiden suhde vakiotuotteisiin oli 0,18. Simulaation tuloksista pystyttiin tekemään kaksi havaintoa: Se osapuoli, joka ottaa suklaan 3D-tulostuksen ensin käyttöönsä eli tekee suklaatuotteiden räätälöinnin, saa voittonsa kasvamaan. Toinen havainto oli, että pelkästään jälleenmyyjien ottaessa suklaan 3D-tulostuksen käyttöön valmistajien voitot vähentyvät merkittävästi räätälöityjen suklaatuotteiden kysynnän kasvaessa. Julkaisun mukaan suklaanvalmistajien kannattaisi siis ottaa 3D-tulostus käyttöön ennen jälleenmyyjä.

Jia *et al.* simulaation tulosten perusteella suklaan 3D-tulostusta voisi pitää häiritsevänä teknologiana. Julkaisussa kuitenkin mainitaan, että suklaan 3D-tulostus ei ole vielä teknologiana tarpeeksi kypsä vaikuttaakseen nykyiseen liiketoimintamalliin. Tämä työ pyrkii vastaamaan kysymykseen, mitä teknisiä haasteita suklaan 3D-tulostukseen liittyy. Työssä pohditaan myös mahdollisia ratkaisuja havaittuihin ongelmiin pohjautuen kirjallisuuteen sekä henkilökohtaiseen kokemukseeni suklaan Pullonkaulan 3D-tulostimen kehitysaikaisesta testauksesta ja käyttöönotosta Fazerin vierailukeskuksessa.

Työn ensimmäisessä luvussa käsitellään suklaata 3D-tulostusmateriaalina. Toinen luku käsittelee tulostuspään suunnittelua. Kolmas luku sisältää lyhyen katsauksen suklaan 3D-tulostuksen kannalta oleellisiin tulostusparametreihin. Yhteenvedossa ehdotetaan mahdollisia ratkaisuja suklaan 3D-tulostuksen kehittämiseksi sekä esitetään hammaspyörä- tai lohkoroottoripumppuun perustuva konsepti tulostuspäästä. Eri suklaalaaduista työssä keskitytään tarkastelemaan erityisesti tummaa suklaata.

2. SUKLAA 3D-TULOSTUSMATERIAALINA

Tämä luku käsittelee suklaata 3D-tulostusmateriaalina ja toimii johdatuksena seuraavaan lukuun, jossa käsitellään suklaalle sopivan pursotukseen perustuvan tulostuspään (engl. print head) suunnittelua. Tulostuspäällä tarkoitetaan 3D-tulostimen osaa, jonka tehtävänä on siirtää ainetta tai sidosainetta tulostettavaan kappaleeseen (Lehtinen 2018).

Materiaalina suklaa tarjoaa joitakin haasteita esimerkiksi verrattuna 3D-tulostuksessa yleensä käytettyihin muoveihin, kuten PLA:han tai ABS:ään. Muoveja voidaan syöttää vetopyörän avulla kiinteänä filamenttina eli muovinauhana lämmitettyyn tulostuspäähän. Lämmitetyn tulostuspään kärjessä filamentti sulaa nestemäiseen muotoon, painautuu ulos suuttimesta ja jähmettyy osaksi kappaletta. Menetelmää kutsutaan FDM:ksi (Fused Deposit modelling) tai FFF:ksi (Fused Filament Fabrication). Menetelmä mahdollistaa muun muassa keveän tulostuspään suunnittelun, koska filamenttikelan ei tarvitse liikkua tulostuspään mukana. Suklaa on kiinteässä muodossa haurasta ja se murtuisi, jos sitä yritettäisi syöttää vetopyörän avulla lämmitettyyn tulostuspäähän. Tämä on yksi syy, miksi 3D-suklaatulostimissa säilötään suklaa yleensä sulana ja sula massa ohjataan tulostuspään kärkeen. Nestemäisiä materiaaleja käsitteleviä tulostuspäitä, jotka perustuvat pursotukseen, kutsutaan harrastelijapiireissä englanniksi nimellä paste extruder (Verbruggen 2014).

3D-tulostuksessa suklaan erityiset reologiset ominaisuudet korostuvat. Luvussa käsitellään suklaan ainesosat sekä teoriaa suklaan reologiasta ja temperoinnista. Eri suklaaladuista tässä työssä keskitytään tarkastelemaan lähinnä FCIA:n (Fine Chocolate Industry Association) kriteerien mukaista hienoa tummaa suklaata. Luvun viimeisessä alaluvussa on yhteenveto 3D-tulostuksessa huomioitavista suklaan materiaaliominaisuuksista.

2.1 Suklaan ainesosat

Tässä alaluvussa käydään läpi ainoastaan suklaan pääainesosat menemättä yksityiskohtiin suklaan valmistuksesta. Tumman suklaan pääainesosat ovat

- kaakaomassa,
- kaakaovoi ja
- sokeri.

FCIA:n kriteerien mukaan hieno tummasuklaa saa sisältää myös lesitiiniä sekä vaniljaa. Monessa kaupallisessa suklaassa käytetään paljon muitakin makuja kuin vaniljaa sekä muita ainesosia, mutta niitä suklaita FCIA ei luokittele enää hienoiksi suklaiksi. (Fine Chocolate Industry Association 2018)

Kaakaomassaa saadaan hienontamalla kaakaopapuja. Kaakaomassa on lämpimänä juoksevaa, koska se sisältää noin 50% kaakaovoita (Beckett *et al.* 2009, s. 132; Notter 2011, s. 11). Loput kaakaomassasta on kaakaopavun kiintoaineita, jotka antavat suklaalle kaakaon maun sekä ruskean värin. Kaakaomassa itsessään on hyvin kitkerän makuista.

Suklaaseen lisätään yleensä myös pelkkää kaakaovoita parantamaan suutuntumaa ja sulan suklaan juoksevuutta. Kaakaovoi on väriltään vaaleaa ja sitä saadaan kaakaomassasta muun muassa puristamalla kaakaomassaa kovalla paineella hydraulipuristimessa. Kaakaovoi on suklaassa kallis ainesosa. Tästä syystä hienoina pidetyt suklaat, joissa on suuri kaakaovoipitoisuus, ovat usein kalliimpia. (Fine Chocolate Industry Association 2018)

Suklaatuotteisiin usein merkitään prosentteina kaakaopitoisuus. Prosenttiluku ei kerro juurikaan mitään suklaan laadusta, koostumuksesta ja ominaisuuksista, vaan ainoastaan kaakaoperäisten ainesosien eli suklaamassan, kaakaovoin ja kaakaojauheen yhteisen osuuden kokonaismassasta (Notter 2011, s. 13; Fine Chocolate Industry Association 2018). Kuvasta 1 havaitaan, että kaakaopitoisuus kertookin parhaiten ainoastaan sokerin määrän suklaassa, koska lähes loput suklaan kokonaismassasta on sokeria.



Kuva 1. Eri tummia suklaita, joilla kaikilla on sama kaakaopitoisuus (73%). Ainesosat - kaakaomassa, kaakaovoi ja sokeri - eroteltu eri osuuksiksi. (Albert Uster Imports, Notter 2011 mukaan, s. 13)

Suklaassa käytetään myös lesitiiniä tai polyglyserolipolyrisiiniioleaatia (PGPR) emulsioaineena. Emulsioaineen päätarkoitus on vähentää tarvittavan kaakaovoin määrää. Se auttaa merkittävästi sokeria sekoittumaan kaakaovoihin ja vähentää sulan suklaan viskositeettiä. (Wolf 2011) Emulsioaineiden osuus on tavallisesti noin 0.5 – 0.7%. (Talbot *et al.* 2009, s. 41)

Valko- ja maitosuklaaseen lisätään myös maitojauhetta. Maitosuklaasta ja tummasta suklaasta poiketen valkosuklaa ei sisällä lainkaan kaakaomassaa. Kaakaopavusta se sisältää pelkästään kaakaovoita, joka on melko mautonta. Valkosuklaaseen maku saadaan lisäämällä siihen sokeria ja maitojauhetta sekä mausteita ja makuja, kuten vaniljaa.

Myös muut instituutiot kuin FCIA sekä monet valtiot ovat asettaneet kriteerejä suklaatermien käytölle. Muun muassa EU:n direktiivissä (2000/36/EY) suklaassa sallitaan enintään 5% muita kasvirasvoja kuin kaakaovoita. Kaakaokuiva-ainetta pitää olla suklaassa vähintään 35%, josta vähintään 18% on kaakaovoita.

2.2 Kaakaovoin merkitys

Suklaa on suspensio eli nestemäisen jatkuvan faasin sekä kiinteän aineen muodostama seos. Hienossa tummassa suklaassa kaakaovoi on ainut jatkuva faasi ja se määrittää pitkälti suklaan fysikaaliset ominaisuudet. Suklaasta noin 30 % on yleensä kaakaovoita ja loput 70 % on kaakaovoihin dispergoituneita sokerin ja kaakaon kiintoaineita.

2.2.1 Kaakaovoin polymorfia

Kaakaovoi on monen muun rasvan tavoin polymorfinen yhdiste. Polymorfia tarkoittaa yhdisteen tai alkuaineen kykyä esiintyä useammassa eri kidemuodossa. Eri kidemuodoilla on erilaiset fysikokemialliset ominaisuudet, kuten sulamispiste, tiheys tai kovuus. Puhutaan myös kidemuodon stabiilisuudesta, jolla tarkoitetaan sitä, kuinka pysyvä kidemuoto on. (Hilfiker 2013, s. 85–87)

Perinteisen käsityksen mukaan kaakaovoissa voi esiintyä 6 eri kidemuotoa. Tässä työssä käytetään Willen ja Luttonin tapaa merkitä kidemuodot roomalaisin numeroin I – VI. Tavan mukaan suurinta roomalaista numeroa käytetään kidemuodosta, jolla on suurin sulamispiste ja joka on stabiilein. Kirjallisuudessa käytössä on myös joukko kreikkalaisia kirjaimia, jotka järjestettyinä epästabiilista stabiilimpaan ovat gamma (γ), alpha (α), beeta2 (β_2'), beeta1' (β_1'), beeta2 (β_2) ja beeta1 (β_1). Perinteisen käsityksen mukaiset sulamispisteet eri kidemuodoille ovat esitetty taulukossa 1. Kaakaovoin kidemuodot on merkitty sekä roomalaisin että kreikkalaisin kirjaimin.

Taulukko 1. Kaakaovoin kidemuotojen sulamispisteet Willen ja Luttonin (1966) mukaan. (katso Beckett et al. 2009, s. 262; Talbot et al. 2009, s. 324)

Kidemuoto	sulamispiste (°C)
I / γ	17,3
II / α	23,3
III / β_2'	25,5
IV / β_1'	27,5
V / β_2	33,8
VI / β_1	36,3

Kidemuotoja I – IV pidetään epästabiileina ja kidemuotoja V ja VI stabiileina. Kaakaovoi on monotrooppinen, joka tarkoittaa, että epästabiilimmat muodot muuttuvat itsestään stabiilimpaan, vähäenergisempään muotoon (Talbot *et al.* 2009, s. 346). Muutoksen nopeuteen vaikuttavat säilytyslämpötila ja lämpötilan vaihtelut. Myös stabiilina pidetty V-kidemuoto muuttuu hitaasti VI muotoon, mutta muutos voi kestää jopa 4 kuukautta (Wille ja Lutton 1966, Talbot *et al.* 2009 mukaan, s. 324).

Oikean kiderakenteen aikaansaaminen suklaan sisältämään kaakaovoihin on suklaata valmistessa hyvin tärkeää. Kidemuoto V on tavoiteltu, koska sen muodostama rakenne antaa suklaalle parhaimman kiillon, rapean ja suussa sulavan suutuntuman sekä pitkän säilymisiän. Kidemuoto V ei myöskään sula yhtä helposti kosketuksesta kuin epästabiilit kidemuodot I - IV. Kidemuoto VI ei ole tavoiteltu kidemuoto, vaikka se onkin stabiili. Korkeamman sulamispisteensä takia se ei sula suussa yhtä hyvin ja suklaa on kovaa ja haurasta. (Talbot *et al.* 2009, s. 314–315) Stabiilin V-kiderakenteen aikaansaamiseksi on kehitetty erilaisia suklaan temperointimenetelmiä, joita käsitellään alaluvussa 2.2.4.

Käsitys suklaan kuudesta eri kidemuodosta perustuu Willen ja Luttonin sekä Larssonin tekemälle tutkimustyölle vuonna 1966. Uudemman Van Malssen *et al.* (1999) tutkimuksen mukaan kidemuotoja saattaakin olla vain 5 erilaista. Kidetyypit III ja IV eivät olekaan erilliset kidemuodot, vaan kyseessä onkin spektri samasta kidemuodosta. Lisäksi kidemuoto I:n sulamispiste onkin huomattavasti aikaisempaa käsitystä alhaisempi. Taulukossa 2 on esitetty uuden käsityksen mukaiset sulamispisteet eri kidemuodoille. Sekä perinteisen että uuden käsityksen mukaan kaakaovoilla on samat kaksi stabiilia muotoa V ja VI. Stabiileista muodoista käytetään uuden tavan mukaa merkintää β_V ja β_{VI} .

Lopputulokseen kaakaovoin kidemuotojen määrästä ei ole vielä päästy (Talbot *et al.* 2009, s. 323). Fesseksen (2005) differentiaalisella pyyhkäisykalometrialla (engl. differential scanning calorimetry) tehdyn tutkimuksen perusteella kidemuotoja näyttäisi kuitenkin olevan 6 erilaista.

Taulukko 2. Kaakaovoin kidemuotojen sulamispisteet Van Malssen *et al.* mukaan. (Smith & van Malssen, 2002)

<i>kidemuoto</i>	sulamispiste (°C)
$\gamma / sub - \alpha$	0
α	17
β'	21–28
β_V	31,5
β_{VI}	33,5

Käsitys kuudesta eri kidemuodosta elää vahvasti vielä konditoriamestarien keskuudessa. Lisäksi myös kirjallisuudessa käytetään yhä usein V-notaatiota, minkä takia tässä työssä

selvyyden vuoksi ei käytetä Smithin uutta notaatiota β_V . Epästabiilien kidemuotojen notaatiolla ei ole suurta merkitystä tämän työn kannalta.

Suklaassa esiintyviä kidemuotoja voidaan tutkia muun muassa differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrialla eli DSC:llä (eng. differential scanning calorimetry). Laitteella voidaan määrittää suklaassa esiintyvien eri kidemuotojen suhteellinen osuus. DSC-kuvaajassa on esitetty systeemiin tuotu energia suhteessa näytteen lämpötilaan. Kaakaovoin kiteiden sulaminen on endoterminen reaktio. Jokaisen sulaneen kidemuodon kohdalla nähdään piikki DSC-kuvaajassa.

2.2.2 Kaakaovoin koostumus

Kaakaovoi koostuu muiden rasvojen tavoin triglyserideistä. Triglyseridit koostuvat yhdestä glyserolimolekyylistä ja kolmesta rasvahappoketjusta.

Kaakaovoi koostuu suurimmaksi osaksi kolmesta eri triglyseridistä: POS, SOS ja POP. Kirjaimet tarkoittavat triglyseridin kolmea rasvahappoketjua: P tarkoittaa palmitiinihappoa, O oleiinihappoa ja S steariinihappoa. Oleiinihappo on kertydyttymätön rasvahappo. Palmitiinihappo sekä steariinihappo ovat tyydyttyneitä rasvahappoja. Kaikista tyydyttyneistä hapoista voidaan käyttää myös yhteistä lyhennettä T. Kaakaovoin yksinkertainen paljon symmetrisiä TOT-muotoisia triglyserideitä sisältävä rakenne tekee siitä hyvin polymorfisen aineen verrattuna muihin rasvoihin. (Beckett *et al.* 2009, s. 261)

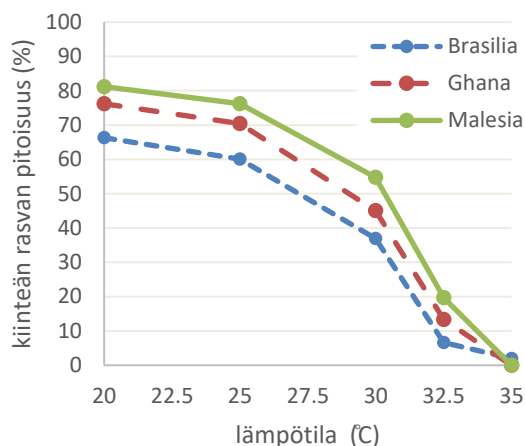
Jokaisella eri triglyseridillä on hieman eri sulamispiste. Triglyseridien pitoisuudet vaihtelevat kaakaolajikkeesta ja kasvuolosuhteista riippuen, mikä heijastuu kaakaovoin sulamispisteen vaihtelevuutena. TOT-muotoiset triglyseridit ovat huoneen lämmössä usein kiinteitä, TOO-muotoiset nestemäisiä. Taulukoiden 1 ja 2 kaakaovoin kidemuotojen sulamispisteet ovat siis keskimääräisiä arvoja kaikista kaakaovoin sisältämistä triglyserideistä. Taulukossa 3 on esitetty kasvupaikan mukaan kaakaovoin triglyseridipitoisuudet.

Taulukko 3. Kaakaovoin triglyseridipitoisuudet kasvupaikan mukaan (*T* = Tyydyttynyt happo, *O* = Oleiinihappo, *Li* = Linolihappo). (Loders Croklaan, Beckett *et al.* 2009 mukaan, s. 419)

	Brasília	Ghana	Malesia
TTT	1,0	1,4	2,3
TOT	63,7	76,8	84,0
TTO	0,5	0,4	0,5
TLiT	8,9	6,9	6,8
TOO	17,9	8,4	5,1
OOO	8,0	6,1	1,3

Kaakaovoin kiinteän rasvan osuutta voidaan tutkia NMR-mittauksien (engl. nuclear magnetic resonance) avulla. Kuvassa 2 on vertailtu brasilialaisen, ghanalaisen ja malesialaisen

kaakaovoin kiinteän rasvan osuutta eri lämpötiloissa. Kuvasta havaitaan, että malesialainen kaakaovoi on kaikista kiinteintä ja brasilialainen nestemäisintä (ts. pehmeintä). Ghanasta peräisin oleva kaakaovoi on näiden välissä. Tulokset korreloivat taulukossa 3 esitetyn tiedon kanssa. Esimerkiksi brasilialaisessa kaakaovoissa on eniten huoneenlämmössä useimmiten nestemäisiä TOO- sekä vähiten kiinteitä TOT-muotoisia triglyserideitä.



Kuva 2. Vertailu eri maissa tuotetun kaakaovoin fysikaalisesta pehmeystestä. Arvot Loders Croklaan mukaan. (katso Beckett *et al.* 2009, s. 420)

Noin 70% maailman kaakaosta tulee Länsi-Afrikasta Norsunluurannikolta (40%), Ghanasta (20%) tai muista lähivaltioista. Kolmanneksi suurin tuottaja on Indonesia. Brasilian kaakaotuotanto on vähentynyt merkittävästi kaakaota vaivanneiden tautien vuoksi. Kaikki kaupoissa myytävä bulkkisuklaa on yleensä Forastero-lajiketta. (Beckett *et al.* 2009, s. 11,40)

2.2.3 Kiteytyminen

Suklaan jähmettyessä nestemäisessä muodossa olevat triglyseridit alkavat muodostamaan kiteitä. Ennen seuraavaa alalukua, jossa käsitellään suklaan temperointimenetelmiä, on hyvä käydä taustalla tapahtuvat kiteytymisen mekanismit. Johnsonin (1998) ja Hartelin (1991) mukaan kiteytymiseen ja temperointiin vaikuttavia prosessiparametreja ovat lämpötila, aika ja sekoituksen nopeus (katso Talbot *et al.* 2009, s. 330).

Kiteytymisen voidaan ajatella koostuvan kahdesta eri vaiheesta: nukleaatiosta ja kiteiden kasvusta. Nukleaatiolla tarkoitetaan ensimmäisten kiteiden syntyä sulasta suklaasta. Nukleaatio tapahtuu yleensä ensimmäiseksi temperointikoneessa viileitä pintoja vasten (Talbot *et al.* 2009, s. 230). Kiteiden kasvun vaiheessa nukleaatiokeskuksien ympärille alkaa kehittyä samaa kidemuotoa lisää. Kiteet siis kopioituvat ympärilleen sulaan suklaaseen muodostaen kiderakenteita. Sekoittaminen tehostaa nukleaatiokeskuksien leviämistä ja kiderakenteiden kasvua. Käytännössä nukleaatio ja kiteiden kasvu ovat osittain päällekkäisiä tapahtumia. (Hartel 1992; Timms 2003, Foubert *et al.* 2007 mukaan, s. 472)

Nukleaatio tapahtuu kaikista nopeimmin suklaan epästabiileihin kidemuotoihin. Epästabiili IV rakenne kuitenkin muuttuu nopeasti V kidemuodoksi. Jotta toivottuja V kidemuotoja voidaan muodostaa, pitää suklaa käytännössä käyttää lämpötilassa, missä esiintyy myös ei-toivottuja IV kiteitä. IV kiteet voidaan sulattaa pois nostamalla lämpötilaa niin, että jäljelle jää vain V kiteitä. (Talbot *et al.* 2009, s. 325)

Suklaassa on havaittu lisäksi myös muisti-ilmiö. Sulan suklaan historia vaikuttaa, mihin kidemuotoon se jähmettyy. Jotta suklaasta voidaan pyyhkiä aikaisempi historia, pitää se lämmittää reilusti yli sulamispisteensä. Muisti-ilmiön avulla temperoitu noin 1–2°C yli V kiteen sulamispisteen oleva suklaa voi kiteytyä suoraa takaisin V-kidemuotoon. (van Malssen *et al.* 1996, Talbot *et al.* 2009 mukaan, s. 324)

2.2.4 Temperointimenetelmät

Suklaan temperoinnilla pyritään saamaan aikaan suklaan sisältämään kaakaovoihin haluttu V kiderakenne. Temperoinnilla pyritään myös vaikuttamaan suklaan työstettävyyteen: temperoidun suklaan viskositeetti on suurempi ja se asettuu nopeammin (Beckett *et al.* 2009, s. 276, 348). Suklaamestari Ewald Notterin kirjoittamassa kirjassa esitellään 3 erilaista menetelmää suklaan temperointiin käsin. Lopputulos jokaisessa menetelmässä on sama - juoksevaa suklaata, jossa on riittävästi V-muotoisia kiteitä. Jos suklaan temperointi menee pilalle, voi suklaan temperoida aina uudestaan.

Alaluvussa käydään läpi lyhyesti Notterin esittelemät menetelmät tumman suklaan temperointiin (Notter 2011, s. 42–48). Menetelmät ovat hyödyllistä tuntea, koska niitä voidaan soveltaa suunnitelmassa automaattista temperointia suklaata tulostavaan 3D-tulostimeen. Lisäksi eri menetelmien tuntemisesta on hyötyä suklaan esivalmistelussa 3D-tulostusta varten, vaikka suklaata ei edes temperoitaisi itse 3D-tulostimessa. Mainitut lämpötilat koskevat tummaa suklaata ja ne ovat Notterin suuntaa antavia arvioita useimmille suklaamerkeille. Valko- ja tummalla suklaalla on eri temperoimislämpötilat, koska niiden sisältämät maitorasvat vaikuttavat suklaan rasvakoostumukseen.

Ensimmäisenä Notter mainitsee kirjassaan suoran menetelmän suklaan temperointiin. Suorassa menetelmässä valmiiksi temperoitu suklaa lämmitetään varovasti juoksevaksi 31,1–32,2°C lämpötilaan. Menetelmä on nopea, mutta vaarana on, että suklaata lämmitetään liikaa, milloin kaikki V-muotoiset kiteet sulavat pois ja suklaa jäähtyy villisti eri kidemuotoihin. Suora menetelmä vaatii myös valmiiksi temperoitua suklaata.

Toinen mainittu menetelmä on siemenkiteen käyttäminen. Siemenkiteeksi kutsutaan valmiiksi temperoitua suklaata, jota hyödynnetään sulan suklaan temperoinnissa. Notterin mukaan menetelmä on helppo tapa uudelleen temperoida suklaata, joka on menettänyt temperointinsa. Temperoitava suklaa lämmitetään 46,1–48,8°C, milloin varmistetaan, että kaikki vanhat kiteet sulavat pois suklaasta. Suklaan annetaan jäähtyä hieman, jonka jälkeen aloitetaan sekoittamaan siemenkiteitä eli valmiiksi temperoituja suklaanappeja tai

-raastetta sulan suklaan sekaan. Kun siemenkiteet ovat täysin sulaneet sulan suklaan sekaan, tarkistetaan suklaan lämpötila. Lämpötilan ollessa 31,1–32,2°C temperointi on valmis. Siemenkiteiden kiderakenne alkaa tällöin levitä suklaassa.

Kolmas menetelmä on temperointi pöydällä, jota Notter pitää kaikista haastavimpana, mutta nopeimpana tapana temperoida pienen määrän suklaata (kuva 3). Menetelmä ei tarvitse siemenkiteitä eikä valmiiksi temperoitua suklaata. Temperointi alkaa samalla tavalla kuin toinen menetelmä lämmittämällä suklaa 46,1–48,8 °C:seen, jonka jälkeen suklaan annetaan hieman jäähtyä. Tämän jälkeen suklaasta kaadetaan kaksi kolmasosaa pois marmorialustalle. Suklaa levitetään alustalle lastalla, jonka jälkeen aletaan kaapimaan tasanaisesti reunoilta keskelle, kunnes suklaa alkaa jähmettymään. Suklaan jähmettyessä suklaaseen muodostuu runsaasti epästabiileja kiteitä sekä stabiileja V-muotoisia kiteitä. Marmorialustalla oleva suklaa kerätään takaisin kulhoon lämpimämmän suklaan päälle, jonka jälkeen seosta sekoitetaan kevyesti, niin että lämpötila tasaantuu suklaan työskentelylämpötilaan 31,1–32,2°C. Tämä saa pöydältä kerätyn suklaan epästabiilit kiteet sulamaan, milloin astiaan jää jäljelle vain stabiileja V-muotoisia kiteitä.



Kuva 3. Suklaan temperointi pöydällä. (Notter 2011, s. 47)

Kolmannessa menetelmässä suklaa käytettiin siis hetkellisesti työskentelylämpötilaa alhaisemmassa lämpötilassa, jotta suklaaseen muodostuisi sulattamisen jälkeen nopeasti uusia kiteitä. Vaiheen tarkkaa lämpötilaa Notter ei maininnut.

Suklaapakkauksissa saattaa olla kuva temperointikäyrästä, josta näkee valmistajan suosittelemat lämpötilat suklaan temperointiin. Kuvassa 4 on Callebaut 811 tumman suklaan temperointikäyrä. Temperointikäyrästä nähdään, että ensiksi suklaa pitää sulattaa 45–50°C lämpötilassa, jonka jälkeen se jäähdytetään 27°C lämpötilaan. Lopulta lämpötila kasvatetaan 31–32°C:seen. Katkoviivoilla on esitetty maksimilämpötila, mihin temperoitu suklaa voidaan lämmittää, jos suklaan viskositeetti muuttuu liian suureksi. Callebaut 811 suklaan maksimilämpötila on 34,5°C.



Kuva 4. Tumman Callebaut 811 suklaapakkauksen takaa löytyy temperointikäyrä. (mukaillen GIUNTI al Punto, verkkosivu)



Kuva 5. Pöytätasolle mahtuva temperointikone. (mukaillen Chocovision, verkkosivu)

Teollisuudessa on käytössä runsas määrä erilaisia temperointikoneita, jotka voivat temperoida suklaata jatkuvassa prosessissa (Beckett *et al.* 2009, s. 295–315). Keittiössä käytetään usein pöytätasolle mahtuvia temperointikoneita, jotka pystyvät temperoimaan erän suklaata. Temperointikoneet pystyvät sulattamaan ja pitämään suklaan halutussa lämpötilassa samalla sekoittaen. Useissa koneissa pystytään ajamaan ohjelma, joka käyttää suklaan eri lämpötiloissa ja joka temperoi suklaan automaattisesti. (Notter 2011, s. 36)

2.3 Suklaan harmaantuminen, jäähdytys ja säilytys

Huonosti temperoidun tai pitkään tai huonosti säilötyn suklaan pinnalle voi kertyä harmaa kerros tai keltaisia täpliä. Kerrosta voi erehtyä luulemaan homeeksi. Kyse on kuitenkin todennäköisesti puhtaasta kaakaovoista, joka on vain erottautunut suklaasta omaksi faasikseen. Englanniksi ilmiötä kutsutaan nimellä chocolate bloom. Kaakaovoin kiteiden muuttuessa stabiilimpaan muotoon kiteiden tilavuus vähenee ja samalla niistä vapautuu latenttia lämpöä. Tämä saa osan kaakaovoista kulkeutumaan suklaan pintaan, mihin se sitten jähmettyy vaaleaksi kerrokseksi (Tannenbaum 2004, s. 1134).

Kuvassa 2 näkyy kaksi pilalle mennyttä Pullonkaulan 3D-suklaatulostimella tehtyä kappaletta. Vasemmanpuoleinen muuttui keltaisen täplikkääksi noin parin päivän kuluessa todennäköisesti huonon temperoinnin seurauksena. Oikeanpuolimmainen oli alun perin tumma ja kiiltävä, mutta kappale on hiljalleen harmaantunut ja siihen on tullut muutamia keltaisia laikkuja 2 vuoden säilömisen aikana.



Kuva 6. Pullonkaulan 3D-suklaatulostimella tulostettuja kappaleita, jotka ovat menneet pilalle joko nopeasti (vasemmalla) tai ajan saatossa (oikealla).

Myös sokeri voi aiheuttaa suklaan harmaantumista. Sokerista johtuva harmaantuminen aiheutuu liian kosteasta säilytysilmasta. Suklaan sisältämä sokeri imee itseensä kosteutta ja lopulta sokeri liukenee suklaan pintaan. Kosteuden haihtuessa pinnalle jää ohut harmaa kerros sokeria. Sokerin aiheuttamaa harmaantumista voi myös tapahtua silloin, kun suklaa siirretään kylmästä liian nopeasti lämpimään, milloin lämpimän ilman kosteus tiivistyy suklaan pintaan. Maito- ja etenkin valkosuklaa ovat herkempiä sokerin aiheuttamalla harmaantumiselle, koska ne sisältävät enemmän sokeria kuin tumma suklaa. (Notter 2011, s. 51)

Kaakaovoin ja sokerin aiheuttaman harmaantumisen voi erottaa toisistaan tunnustelemalla: kaakaovoista johtuva harmaa kerros tuntuu sormiin öljyiseltä, koska kaakaovo

liukenee ruumiinlämmöstä. Sokerista johtuva harmaa kerros tuntuu taas ihoa vasten karhealta. Kaakaovoista aiheutuvan harmauden voi poistaa hetkellisesti lämmittämällä suklaata esimerkiksi puhaltamalla kuumaa ilmaa. (Notter 2011, s. 52)

Suklaamestari Ewald Notterin kirjassa käsitellään ideaalisia lämpötiloja suklaan käsittelyyn ja säilömiseen. Notterin mukaan työskentelyhuoneen lämpötila on tärkeä. Jos sulalla suklaalla kestää liian kauan jähmettyä, kaakaovoi kulkeutuu suklaan pintaan ja aiheuttaa harmaan kerroksen. Tämä voi olla myös syy kuvan 2 vasemman kappaleen keltaisiin laikuihin. Parhaimpana työskentelylämpötilana Notter pitää noin 11°C alle temperoidun suklaan lämpötilaa eli noin 18 – 21°C. Tarvittaessa suklaata voidaan myös jäähdyttää nopeasti kylmäsuihkeita käyttäen. (Notter 2011, s. 52, 34)

Teollisuudessa suklaamuotteja saatetaan viilentää kylmennyslaitteilla. Suklaan kiteytyessä sen tilavuus vähenee. Suklaan kutistuminen on muotteja käyttäessä hyvä asia, koska silloin suklaat irtoavat jäähdyttyään helposti muoteista. 3D-tulostaessa materiaalin kutistuminen on kuitenkin, koska se saattaa johtaa kappaleen irtoamiseen tulostusalustasta kesken tulostuksen. Kappaleen tasaiseen jäähtymiseen onkin kokemukseni mukaan syytä kiinnittää 3D-tulostaessa huomiota.

Teollisuudessa viilennyslaitteet viilentävät muotit vaihteittain: ensin 12–15 °C lämpötilassa 5 minuutin ajan, sitten 7–10 °C lämpötilassa 10 – 20 minuutin ajan. Viilennyksen aikana muottien päällä virtaa tasaisesti ilmaa. Lopuksi jäähdytettyjen suklaiden lämpötila nostetaan vielä juuri yli kosteuden tiivistymisrajan, joka riippuu huoneen ilman suhteellisesta kosteudesta. Liian nopea suklaan jäähdytys tai alhainen lämpötila aiheuttavat epästabiileja kidemuotoja, kuten kidemuotoa IV. (Beckett *et al.* 2009, s. 331–332)

Suklaa pitää säilöä hyvin, jotta se ei menetä temperointiaan ja harmaannu. Ewald Notterin mukaan ideaali säilytyslämpötila on 12,2–20 °C. Tällä välillä alhaisempi lämpötila on varmempi. Harmaantumista voi tapahtua etenkin, jos suklaata on säilötty yli 23,8 °C lämpötilassa tai lämpötila on vaihdellut merkittävästi säilytyksen aikana. Säilytystilan ilman suhteellinen kosteus ei saa olla yli 50 %. (Notter 2011, s. 51–52)

Ewald Notter mainitsee myös valon ja ilman haitallisiksi tekijöiksi suklaan säilytyksessä. Suklaa pitäisi suojata ilmalta ja valolta käärimällä se alumiinifolioon sekä lisäksi pakkaamalla se ilmatiiviisti muoviin. Valo ja ilma oksidoivat suklaan ja saavat sen vaihtamaan väriä ja makua. Ewald Notterin mukaan tumma- sekä maitosuklaa sisältävät antioksidantteja, jotka ehkäisevät oksidoitumista - valkosuklaa ei.

Sekä sokeri että kaakaovoi imevät itseensä hajuja. Jotta suklaan maku ei mene pilalle, kädet pitää pestä ja hygieniaan on kiinnitettävä huomiota. Säilytysilman on oltava puhdas ja ilmastoitua. Oikein säilötyinä tyypillinen säilymisikä valko- ja maitosuklaalle on 9–12 kuukautta – tummalla suklaalla 12–18 kuukautta. (Notter 2011, s. 50–53)

2.4 Suklaan reologia

Reologia on oppi fluidin muodonmuutoksesta sekä virtauksesta. Olennainen suure reologiassa on viskositeetti η , joka kuvastaa kuinka paljon neste vastustaa liikettä. Viskositeetin kaava on $\eta = \tau/D$, jossa τ leikkausvoima ja D on leikkausnopeus (Beckett *et al.* 2009, s.248). Leikkausvoimaa voidaan luonnehtia voimaksi, joka tarvitaan kumoamaan viskositeetti ja saamaan neste liikkeelle. Leikkausnopeus on taas nesteen nopeusgradientti. Esimerkiksi putkessa kulkevassa nesteessä, suurin leikkausnopeus esiintyy siellä, missä nesteen nopeus on suurin tai putki on kapea (Talbot *et al.* 2009, s. 257). Viskositeetille käytetään myös merkintää μ ja leikkausnopeudelle merkintää γ .

Suklaan reologiaa on tutkittu hyvin paljon. Suklaan viskositeetilla on vaikutus suklaan suutuntumaan ja makuun. Lisäksi suklaan reologia on otettava huomioon teollisissa prosesseissa kuten suklaata pumpatessa, päällystäessä suklaalla makeisia tai tehdessä ontoja suklaamakeisia muoteilla (Wolf 2011, s. 3). Tehtaalta valmistuvien tuotteiden on näytettävä ulkoisesti samalta ja oltava tasalaatuisia.



Kuva 7. *Päällystyskoneen tuottama viallinen kappale. Vika on aiheutunut suklaan liian suuresta viskositeetista.* (Beckett *et al.* 2009, s. 255)

Myös 3D-tulostaessa suklaan erityiset reologiset ominaisuudet korostuvat. Pursotetun suklaan on pysyttävä kasassa, jotta se pystyy muodostamaan itseään kannattavia kerroksia. Suklaan reologisiin ominaisuuksiin vaikuttavat monet seikat suklaan valmistustavoista ainepitoisuuksiin.

2.4.1 Kaakaon kiintoaineiden vaikutus suklaan reologiaan

Sula suklaa ei käyttäydy newtonilaisen nesteen tavoin. Suklaan viskositeetti ei pysy vakiona, vaan leikkausnopeuden kasvun myötä suklaan viskositeetti pienenee. Ilmiö on havaittavissa kallistamalla astiaa, jossa on sulaa suklaata. Suklaa ei aluksi valu, mutta jos suklaaseen kohdistaa mihin tahansa suuntaan voimaa lastalla tai astiaa täristää, alkaa suklaa valua (Tannenbaum 2004, s. 1135). Suklaan ei-newtonilaisen käyttäytymisen aiheuttaa sen sisältämät kiintoaineet. Kiintoaineiden arvellaan uudelleen järjestäytyvän virtauksessa eräänlaiseksi patjaksi helpottaen kiintoaineiden liikettä suhteessa toisiinsa. Tärinää

hyödynnetään teollisuudessa esimerkiksi levittäessä suklaata tuotteiden päälle tai poistaessa muoteista ilmaa. (Talbot *et al.* 2009, s. 157, 421) Korkeilla leikkausnopeuksilla suklaan käyttäytyminen on havaittu muuttuvan päinvastaiseksi: Suklaa on tällöin diletantti eli viskositeetti kasvaa leikkausjännityksen myötä. (Talbot *et al.* 2009, s. 258)

Viskositeetin muutos on erityisesti havaittavissa leikkausnopeuden ollessa $0,1\text{--}10\text{ s}^{-1}$, jonka jälkeen viskositeetti pysyy pitkään melko samana leikkausnopeudesta riippumatta. Alue on tyypillinen pumpuille ja annostelulaitteille. Diletantti käyttäytyminen tulee esiin vasta leikkausnopeuden ollessa yli 1000 s^{-1} . Käytännössä näin suuria leikkausnopeuksia saattaa esiintyä esimerkiksi pumppujen rattaiden välissä. (Talbot *et al.* 2009, s. 258, 264)

Suklaan kiintoaineiden kokojakauma vaikuttaa suklaan viskositeettiin. Suklaan kiintoaineiden ollessaan kooltaan pienempiä kiintoaineden kokonaisvaltainen pinta-ala kasvaa. Tällöin kaakaovo ei riitä yhtä hyvin kiintoaineiden voiteluun ja viskositeetti kasvaa. Lisäksi Van Der Waalsin voimat lisääntyvät, koska kiintoaineet ovat lähempänä toisiaan. Partikkelikoko vaihtelee suklaassa tavallisesti $1\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ välillä. (Beckett *et al.* 2009, s. 162) Runsas yli $30\text{ }\mu\text{m}$ kokoisten partikkelien määrä saa suklaan maistumaan rakeiselta suussa. (Beckett *et al.* 2009, s. 54; Talbot *et al.* 2009, s. 16) Jos partikkelikoko on todella suuri, kasvaa myös viskositeetti, sillä partikkelit eivät pääse liukumaan toistensa ohi yhtä helposti. (Talbot *et al.* 2009, s. 269)

Suklaan konssauksella tarkoitetaan suklaan valmistuksessa vaihetta, missä telojen alla suklaan eri ainesosat hienonnetaan ja sekoitetaan keskenään mahdollisimman homogeeniseksi seokseksi. Suklaan konssaus vähentää suklaan viskositeettiä, koska kiinteät aineet leviävät sen aikana tasaisesti rasvaan, jolloin rasva voitelee kiinteitä aineita paremmin. (Beckett *et al.* 2009, s. 244)

2.4.2 Kaakaovoin vaikutus reologiaan

Kaakaovo itsessään on newtonilainen fluidi. Mitä enemmän kaakaovoita suklaa sisältää, sitä suurempi on nestemäisen faasin osuus suklaassa ja sitä matalampi on suklaan viskositeetti tiettyynajaan asti.

Nukleaation alkaessa kaakaovoin viskositeetti kasvaa ajan funktiona. Kaakaovoilla ei ole tarkkaa sulamispistettä, koska se koostuu erilaisista triglyserideistä, joilla on omat sulamispisteensä. Kiteiden kasvuvaiheessa kaakaovoin viskositeetti kasvaa, vaikka lämpötila pysyisi samana. Käytännössä temperoitu suklaa voi muuttua jonkin ajan kuluttua liian jähmeäksi kondiittorille, jolloin hän saattaa joutua poistamaan osan temperoidusta suklaasta ja sekoittamaan sulaa temperoimatonta suklaata tilalle (Notter 2011, s. 41).

Kuten alaluvussa 2.2.2 mainittiin kaakaovoin triglyseridipitoisuudet sekä pehmeys vaihtelevat kaakaovoin alkuperästä riippuen. Teollisissa prosesseissa tämä on huomioitava.

Kaakaovoin alkuperämaan vaihtamisella esimerkiksi Ghanasta Indonesiaan voi olla seuraus, että suklaa muuttuu liian jähmeäksi ja päällystyskone (engl. enrobing machine) ei enää tee yhtä tasalaatuista jälkeä. Tasaamaan kausiluonteisia vaihteluita kaakaovoissa suklaavalmistajat saattavat yhdistää kaakaopapuja useilta eri seuduilta (Beckett *et al.* 2009, s. 40).

Kiteiden kasvusta johtuva viskositeetin kasvu on omien kokemuksieni perusteella ollut merkittävä tekijä suklaan 3D-tulostuksessa. Noin tunnin tulostuksen jälkeen viskositeetti nousee niin suureksi, että suutin saattaa mennä tukkoon. Myös kaupallinen suklaatulostinvalmistaja Choc Edge ei suosittele yli tunnin kestäviä tulostuksia omalla 3D-suklaatulostimellaan. (Choc Edge 2018, verkkosivu)

M. Wells väittää, että temperoidun suklaan V-muotoisten kiteiden määrä ei ole merkittävä parametri teollisuudessa, kunhan lämpötila pidetään riittävän korkeana (Talbot *et al.* 2009, s. 272). V-muotoisten siemenkiteiden määrällä on ainoastaan 1–5% vaikutus suklaan viskositeettiin. Kirjassa tarkkailtiin kuitenkin vain viskositeetin muutosta 2 minuutin ajan, mikä on huomattavan vähän verrattuna 3D-tulostimen tulostusaikoihin. Pullonkaulan 3D-tulostimessa suklaa ladataan ruiskuihin, jota ympäröi lämmitetty alumiininen kotelo. On mahdollista, että Pullonkaulan 3D-suklaatulostimessa suuttimen tukkeutumiseen vaikuttaa myös se, että muovisen ruiskun sisällä olevan suklaan lämpötila on oikeasti reilusti alhaisempi, mitä termistori mittaa ruiskua ympäröivän alumiinisen kotelon lämpötilaksi. Tukkeutumiseen voi myös vaikuttaa jossain määrin kaakaovoin erottautuminen suklaasta ruiskun yläosaan, milloin ruiskun alaosaan kiinteän aineen osuus kasvaa ja viskositeetti kasvaa.

2.4.3 Muiden ainesosien vaikutus reologiaan

Suklaassa käytetään emulsioaineita, useimmiten lesitiiniä tai PGPR:ia, alentamaan viskositeettia. Viskositeettiä voi alentaa myös käyttämällä pelkästään kaakaovoita, mutta kaakaovo on kallis aineosa ja sen määrää pyritään rajoittamaan. Nyrkkisääntönä pidetään, että jokainen 0,1% emulsionainetta säästää 1% kaakaovoita. Emulsioainetta lisätään suklaaseen noin 0,5–0,7%. Jos emulsioaineen osuus on tätä enemmän, sillä voi olla päinvastaisia vaikutuksia suklaan viskositeettiin. (Beckett *et al.* 2009, s. 242; Talbot *et al.* 2009, s. 41)

Maitosuklaaseen lisätty maitojauhe sisältää piilorasvoja (engl. trapped fat), jotka - toisin kuin kaakaovoin rasvat - heikentävät suklaan virtausominaisuuksia. Maidon piilorasvoja pyritään välttämään. Eri tavalla valmistettujen maitojauheiden sekä eri sesonkien piilorasva pitoisuuksista on olemassa tieteellisiä julkaisuja. (Wolf 2011, s. 6)

Kosteus lisää suklaan viskositeettiä radikaalisti. Valmiissa suklaassa kosteutta on noin 1%. Jos kosteutta on edes 0,3% enemmän, kasvanut viskositeetti pitää kompensoida yhdellä prosentilla enemmän kaakaovoita. Valmiissa suklaassa ei tarvitse olla kuitenkaan

vähempää kuin 1% vettä, koska tämä vesi on tehokkaasti sitoutunut muihin ainesosiin. Kosteus vähenee konssauksen aikana suklaasta (Beckett *et al.* 2009, s. 244).

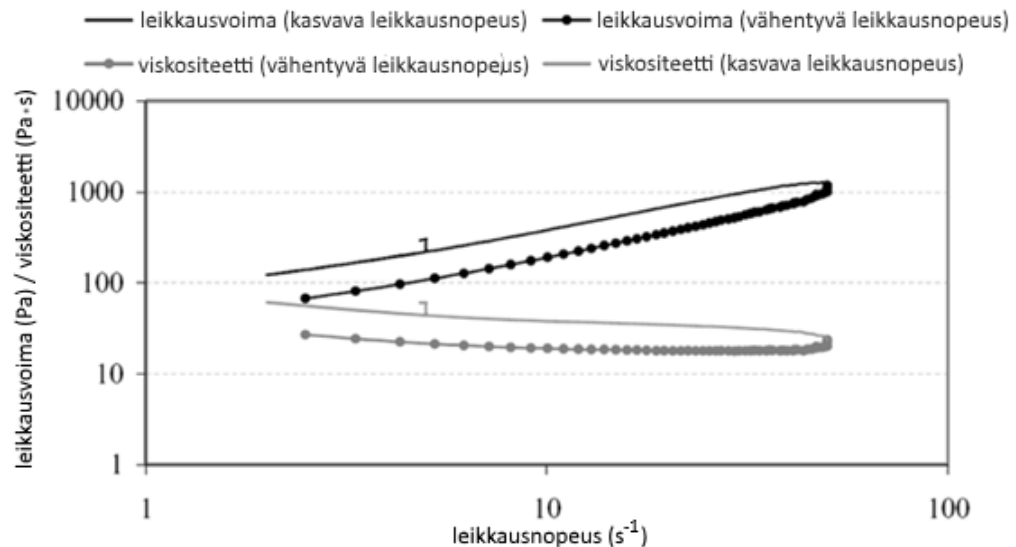
2.4.4 Reologisten ominaisuuksien määrittäminen

Teollisuudessa on tarve pystyä vertailemaan eri suklaiden reologisia ominaisuuksia. Suklaan viskositeetin mittaamiseen käytetään usein reometriä. Laitteessa suklaa pyörii määrättyllä nopeudella ja samanaikaisesti anturi mittaa suklaaseen kohdistuvaa leikkausvoimaa.

Koska suklaan viskositeetti riippuu leikkausnopeudesta, pitää suklaan reologiset ominaisuudet ilmoittaa sovitulla tavalla. Käytössä on IOCCC:n (International Office of Cocoa, Chocolate and Sugar Confectionery) vuonna 2000 julkaisema menetelmä nimeltä Analytical Method 46 (Talbot *et al.* 2009, s. 259 mukaan). New Food lehdessä Bettina Wolfin artikkelissa vaiheita kuvataan seuraavasti:

1. Ennen mittausta sekoita suklaata reometrillä leikkausnopeudella $5s^{-1}$ viiden minuutin ajan.
2. Kasvata leikkausnopeus kolmessa minuutissa arvosta $2s^{-1}$ arvoon $50s^{-1}$
3. Pidä leikkausnopeus arvossa $50s^{-1}$ minuutin ajan.
4. Laske leikkausnopeus kolmessa minuutissa takaisin arvoon $2s^{-1}$.

Mittaustuloksista voidaan tehdä kuvan 8 kaltainen kuvaaja. Kuvaajasta havaitaan, että suklaan viskositeettiin vaikuttaa leikkausnopeuden historia. Wolfin artikkelissa havaittiin myös, että leikkausnopeuden historia ei vaikuta kuitenkaan aina kaikkiin suklaalaatuuihin.



Kuva 8. Suklaan viskositeetti ja leikkausvoima esitetty leikkausnopeuden mukaan menetelmän Analytical Method 46 mukaisesti. (mukaillen Do et al., katso Wolf 2011, s. 3)

Suklaan virtausominaisuuksia voidaan kuvata myös matemaattisilla malleilla. Teollisuudessa on perinteisesti käytetty Casson-mallia. Malli on saanut arvostelua epätarkkuudestaan, ja siitä on julkaistu monia muunnelmia. Tässä työssä suklaan virtausominaisuuksia kuvaavat matemaattiset mallit jätetään kuitenkin esittelemättä.

2.5 Yhteenveto suklaasta 3D-tulostusmateriaalina

Suklaan sisältämä kaakaovoi mutkistaa suklaan käyttämistä 3D-tulostusmateriaalina. Jos suklaata ei ole kunnolla temperoitu, suklaan ulkonäkö, rapea suutuntuma, sulamislämpötila, säilyvyys ja työstettävyys kärsivät. Temperoimattoman suklaan viskositeetti on alhaisempi eikä se asetu yhtä nopeasti. Eri suklaalaaduilla on erilaiset temperoimiskäyrät, koska valko- ja maitosuklaan sisältämät maitorasvat vaikuttavat suklaan rasvakoostumukseen. Temperoimiskäyrä sekä suklaan käyttäytyminen vaihtelee myös suklaamerkin sekä kaakaovoin alkuperän mukaan. Suurin osa tuotetusta kaakaosta on Forastero-lajiketta ja peräisin Länsi-Afrikasta.

Temperointiin on olemassa eri käytännön keinoja. Temperoinnin tavoitteena on muodostaa riittävän paljon V-muotoisia kiteitä sulaan suklaaseen. Alaluvussa 2.2.4 esiteltiin kolme eri käytännön tapaa käsin temperointiin. Temperointia varten on tehty myös koneita. Temperoinnissa kriittisiä tekijöitä ovat lämpötila, aika sekä suklaan sekoitus.

Suklaamestari Ewald Notterin mukaan jäähtymisen kannalta huoneenlämpötila on hyvä olla noin 11°C alempi kuin temperoidun suklaan lämpötila. Tummalla suklaalla tämä tarkoittaa 18,3 – 21,1°C jäähtymislämpötilaa. Jos lämpötila on liian korkea, Ewald Notterin mukaan suklaalla kestää liian pitkään jäähtyä, jolloin kaakaovoi kertyy suklaan pinnalle ja suklaa harmaantuu. Teollisuudessa suklaan jäähtymistä saatetaan kiihdyttää antamalla

suklaan jäähtyä jäähdytinlaitteessa jopa 12–15 °C ja 8–10°C lämpötilassa. Suklaa-artejaanit saattavat käyttää myös kylmäsuihkeita paikalliseen suklaan jäähdytykseen kaltevia taideteoksia tehdessä. Liian nopea kylmennys voi lisätä epästabiilien kiteiden määrää suklaassa. Jäähdyttäessä suklaan tilavuus pienenee kiteytymisen aikana. Epätasaisesti jäähtyessään kappale voi irrota tulostusalustasta.

Sulan suklaan viskositeettiin vaikuttavat muun muassa kaakaon kiintoaineiden hienojakoisuus, kosteus sekä kaakaovoin ja emulsioaineen pitoisuus. Suklaapakkauksiin merkattusta kaakaopitoisuudesta ei voida päätellä juuri mitään suklaan viskositeetista. Kaakaovoin nukleoitumisen ja kiteytymisen takia temperoidun suklaan viskositeetti muuttuu myös ajan funktiona. Tämä voi näkyä 3D-tulostaessa esimerkiksi suuttimen ajoittaisena tukkeutumisena tai tulostusjäljen muuttumisena. Viskositeettiä voidaan säätää alemmaksi kasvattamalla lämpötilaa, jolloin kiteytyminen hidastuu tai osa kiteistä sulaa pois. Kaakaovoilla on havaittu muisti-ilmiötä: Sulanut V-kide voi kiteytyä uudelleen samaan muotoon.

Sula suklaa on ei-newtonilainen tiksotrooppinen neste. Viskositeettiin vaikuttaa hetkellisen leikkausnopeuden lisäksi suklaasta riippuen leikkausnopeuden historia. Teollisuudessa käytetään värinää avuksi esimerkiksi valaessa muotteja. Värinä vähentää suklaan viskositeettia sekä poistaa kuplia suklaasta.

Oikein säilöttynä tyypillinen säilymisikä valko- ja maitosuklaalle on 9–12 kuukautta – tummalla suklaalla 12–18 kuukautta. Suklaa säilyy parhaiten noin 12,2–20 °C asteen vakio lämpötilassa ilmatiiviisti säilöttynä poissa valosta. Suklaan pinnalle voi muodostua ohut harmaa kerros. Se on usein suklaan pinnalle kerääntynyttä kaakaovoita tai sokeria. Kaakaovoin aiheuttama suklaan harmaantuminen on seuraus huonosta temperoinnista, huonosta jäähdytyksestä tai suklaan pitkäaikaisesta säilömisestä. Sokerin aiheuttama harmaus voi johtua liian kosteasta ilmasta. Suklaa, johon on kertynyt harmaa kerros, voidaan temperoida uusiksi ja siihen voidaan saada takaisin hyvä kiilto.

Lisäyksenä aikaisempiin alalukuihin, suklaalla on myös viskoelastisia ominaisuuksia. Teollisuudessa tämä ilmiö tulee esiin suklaan jättäessä roikkuvan vanan suuttimesta esimerkiksi annostellessa suklaata muotteihin. Ennen kuin vana pyyhkiytyy muualle, se kannattaa imeä takaisin suuttimen sisälle. (Talbot *et al.* 2009, s. 282)

Luku 1 oli ainoastaan kevyt katsaus suklaasta tehtyyn tutkimukseen. Käsittelemättä jätettiin muun muassa kasvirasvat, joita saatetaan käyttää korvaamaan kaakaovoi, ja lukuisat muut makeutusaineet ja lisäaineet, joita suklaassa voidaan käyttää. Pullonkaulan 3D-tulostimella on tehty testejä blokkisuklaalla, joka sisältää palmuöljyä. Blokkisuklaata voidaan tulostaa aivan eri tavalla, koska sitä ei tarvitse temperoida. Myös blokkisuklaan jäähdytysominaisuudet ovat erilaiset. Työssä keskitytään kuitenkin tarkastelemaan lähinnä vain FCIA:n määritelmän mukaisen tumman suklaan pursotusta. FCIA:n mukaan tumma suklaa saa sisältää vain kaakaovoita, kaakaomassaa, sokeria, lesitiiniä ja vaniljaa.

3. TULOSTUSPÄÄN SUUNNITTELU

Jia et al. (2016) toteavat julkaisussaan, että suklaan 3D-tulostus ei ole vielä teknologiana täysin kypsä. Choc Edgen verkkosivuilla on mainintoja muutamista teknologian rajoitteista, jotka on havaittu myös Pullonkaulan 3D-suklaatulostimen kehitysaikaisessa testauksessa sekä käyttöönottossa Fazerin vierailukeskuksessa. Ruiskuun perustuva 3D-suklaatulostin ei auta vähentämään työvoimakustannuksissa. Operaattorin pitää valvoa tulostetta sekä nostaa tulostuslämpötilaa tai vaihtaa ruiskuun suklaa, jos suklaan viskositeetti kasvaa liian suureksi. Viskositeetin muuttumisen takia ei voida myöskään tulostaa luotettavasti yli 60 minuuttia samaa mallia, koska tulostuslaatu alkaa kärsimään. Suklaan temperointi vaatii operaattorilta myös työtä sekä opettelemista, vaikka hänellä olisikin temperointikone apunaan. Ongelmia suklaan 3D-tulostuksessa aiheuttavat siis etenkin suklaan viskositeetin ja jäähtymisominaisuuksien muuttuminen tulostuksen aikana sekä temperointi.

Edellisessä luvussa tehtiin yhteenveto suklaan asettamista haasteista suklaan 3D-tulostukseen. Tässä luvussa tutustutaan maailmalla tehtyihin mekaanisiin ratkaisuihin sekä patentteihin suklaan 3D-tulostamiseksi pursotusmenetelmällä. Luku sisältää myös arvioita tehtyjen teknisten ratkaisujen soveltuvuudesta. Seuraaviin kysymyksiin yritetään löytää vastauksia:

- Miten minimoida suklaan 3D-tulostukseen liittyvää käsin tehtävää työtä?
- Miten parantaa 3D-tulostimien toimintavarmuutta pitkissä tulostuksissa?
- Miten parantaa tulosteiden tarkkuutta?
- Miten parantaa 3D-tulostimen tuottavuutta?


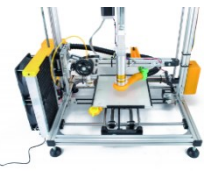





Tutkimus on täysin kvalitatiivista. Tutkimuksen perusteella on kehitetty yhteenvedossa esiteltävä tulostuspään konsepti, jonka rakentaminen ja käytännön testaus jäävät myöhemmäksi.

3.1 Vertailu 3D-suklaatulostimista

Erilaisia 3D-suklaatulostimia on olemassa jo hyvin paljon. Taulukossa 3 on vertailtu eri valmistajien tekemiä 3D-suklaatulostimia. Mukana on myös maineikas Etelä-Afrikkalainen Cheetah 2D-suklaatulostin. Osa taulukon tiedoista perustuu arvioon, koska lähteissä ei ole aina tarkasti mainittu laitteen teknisiä ominaisuuksia.

Ensimmäisenä kaupallisena 3D-suklaatulostinvalmistajana pidetään Choc Edgeä vuonna 2012 julkaisemallaan Choc Creator V1 koneellaan. Uusin vuonna 2016 julkaistu Choc Creator V2 Plus eroaa ensimmäisestä mallista muun muassa pesukoneenkestävällä, uudelleen käytettävällä ruiskulla sekä kosketusnäytöllä.

Taulukko 4. Eri suklaatulostimien vertailu. (lähteet merkattu taulukkoon)

Kuva							
Tekijä	Choc Edge	Boris Landoni	3D-Systems & Hershey	3DCloud	Porimy	Fouche 3D Printing	Pullonkaura ry
Laitteen-nimi	Choc Creator V2+	3Drag Chocolate extruder	Cocojet	Mmuse	3D Food Printer	Cheetah	3D-suklaatulostin
Vuosi	2016	2014	2014	2017	2016	2000	2016
Syöttömekanismi	Askelmoottorikäyttöinen ruiskupumppu	Askelmoottorikäyttöinen ruiskupumppu	Hammasyörä- tai ruuvipumppu	Ruuvipumppu	Ruuvipumppu	Jokin järeä teollinen pumppu	Askelmoottorikäyttöinen ruiskupumppu
Kinematikka ja työala	Kartesinen xyz (mm) 180x180x40	Kartesinen xyz (mm) 200x200x200	Kartesinen xyz (mm) Arviolta 150x150x150	Kartesinen xyz (mm) 160x120x150	Kartesinen xyz (mm) 100x100x150	8-päinen tulostuspää ja liukuhihna. Yhden pään työala arviolta (mm): 2000x150	Delta-kinematiikka: Halkaisija: 80 Huippu: 50
Kärjen lämmitys	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Jäähdytys	Ei	Jäähdytetty puhallus tulostuspäähän.	Luultavasti jäähdytetty sisälämpötila.	Luultavasti jäähdytetty sisälämpötila.	Suklaasäiliön (suppilon) jäähdytys.	Ei	Puhallus tulostuspäähän ja jäähdytetty alusta.
Kaupallistettu	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä	Myydään tulosteita, ei laitetta	Ei
Lähde	Choc Edge verkkosivu	Boris Landoni (2014) artikkeli Open Electronics verkkosivuilla	Sarah Buhr (2015) artikkeli TechCrunch verkkosivuilla	3D Printers Online Store verkkosivu	Wang <i>et al.</i> 2017 patentti, Porimy verkkosivu	Fouche 3D Printing verkkosivu	suklaatulostin.fi verkkosivu

Boris Landonin suunnittelema suklaan tulostukseen soveltuva tulostuspää on erityisesti huomiota herättävä. Tulostuspää sopii 3Drag 3D-tulostimeen, jonka rakennusohjeet ovat avoimesti saatavilla RepRap -sivustolla. Tulostuspään toiminta perustuu askelmoottori-käyttöiseen ruiskupumppuun. Piirustuksia itse tulostuspästä ei ole avoimesti saatavilla, mutta tulostuspään kasausohjeissa kaikki osat näkyvät selkeästi. Tulostuspäätä myydään Open Electronicsin verkkosivuilla hintaan 145€. 3Drag tulostimen ja tulostuspään rakennussarjoja myydään yhteensä tarjoushintaan 642,60€, joka on hyvin edullinen hinta 3D-suklaatulostimelle. (Landoni 2014, verkkosivu)

Muun muassa belgialainen yritys Miam Factory käyttää todennäköisesti Boris Landonin suunnittelemaa suklaatulostuspäätä 3D-suklaatulostimessaan ja on valmistanut sen avulla erittäin näyttäviä suklaakappaleita (kuva 9). Miam Factory -yritys perustuu Liegen yliopiston Gastronomian laboratoriossa tehtyyn tutkimukseen suklaan 3D-tulostuksesta. Landonin tulostuspäähän on saatavilla myös erillinen jäähdytysyksikkö, mutta Miam Factory ei sitä 3D-tulostimessaan käytä. (Miam Factory, verkkosivu)



Kuva 9. Miam Factory yrityksen valmistamia suklaatulosteita. (mukaillen Miam Factory, verkkosivu)

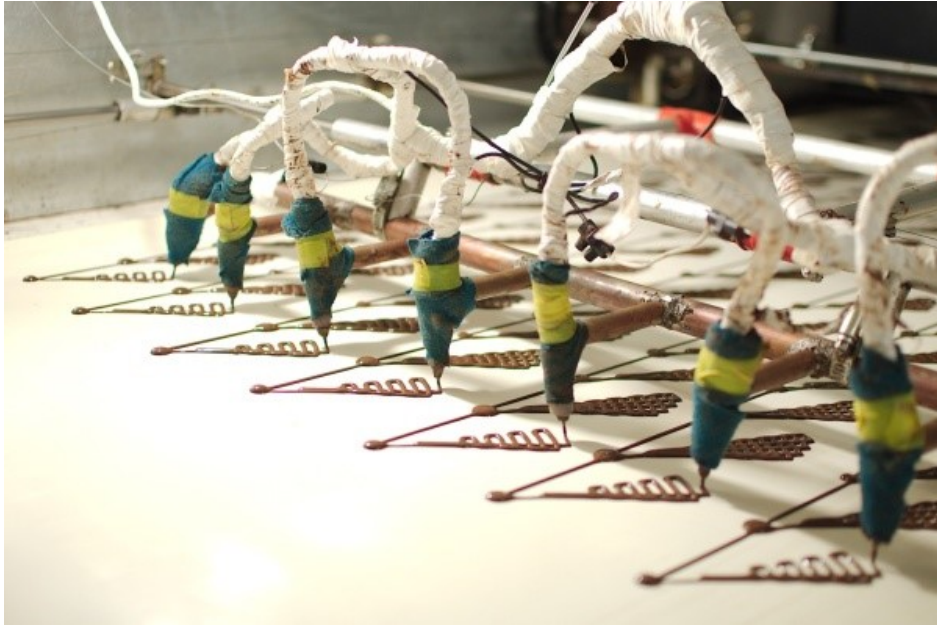
Yksi maailman suurimmista 3D-tulostinvalmistajista, amerikkalainen 3D-systems, on kehittänyt myös yhdessä suklaavalmistaja Hersheyn kanssa omaa 3D-suklaatulostinta nimeltä Cocojet. Cocojet esiteltiin ensimmäisen kerran jo vuonna 2014 joulukuussa Hersheyn järjestämässä makeisnäyttelyssä (Godoi *et al.* 2016, s. 47). Cocojettiä ei kuitenkaan ole kaupallistettu, eikä laitteesta ole myöskään vuoden 2015 jälkeen julkaistu uusia uutisia. Cocojetin tulostamat kappaleet ovat olleet laadultaan melko hyviä. Erityisen hyvin Cocojet on onnistunut kaltevien rakenteiden sekä siltarakenteiden tulostuksessa. Cocojetin tulostuspää ei perustu perinteiseen ruiskuun, vaan tulostuspään pienestä koosta päätellen suklaata annostellaan luultavasti hammaspyörä- tai ruuvipumpun avulla.

Kiinassa on kehitetty myös useita 3D-suklaatulostimia. Taulukossa 4 esillä on Porimyn 3D Food Printer sekä 3DCloudin Mmuse. Kummassakin laitteessa suklaan syöttö perustuu ruuvipumppuun. Ruuvipumpun etuna verrattuna ruiskupumppuun on, että suklaata ei tarvitse sulattaa etukäteen ja ladata ruiskuun, vaan se voidaan lisätä rouheena suoraan laitteeseen. Tämä vähentää suklaan 3D-tulostukseen liittyvää käsin tehtävää työtä merkittävästi, ja mahdollistaa myös suklaan lisäyksen kesken tulostuksen. Laitteiden tulosteet ovat olleet melko rosoisia laadultaan verrattaessa Choc Creatoriin, Coccojettiin tai 3Drag tuottamiin tulosteisiin. Tämä voi myös johtua malesialaisen kaakaovoin käytöstä, joka jähmettyy nopeammin. (Beckett *et al.* 2009, s. 374–375) Amerikkalaisessa Coccojet ja kiinalaisissa Mmuse sekä 3D Food Printer tulostimissa on kaikissa suljettu tulostuskammio.

3D Food Printer -tulostimessa on ilmeisesti haasteita suklaan jumiutumisen kanssa: Porimy suosittelee Mantihal *et al.* mukaan lisäämään tulostettavan suklaan sekaan magnesiumstearaattia parantamaan suklaan juoksevuutta sekä ehkäisemään tarttumista ruuviin sekä suppiloon ja hidastamaan suklaan kiteytymistä.

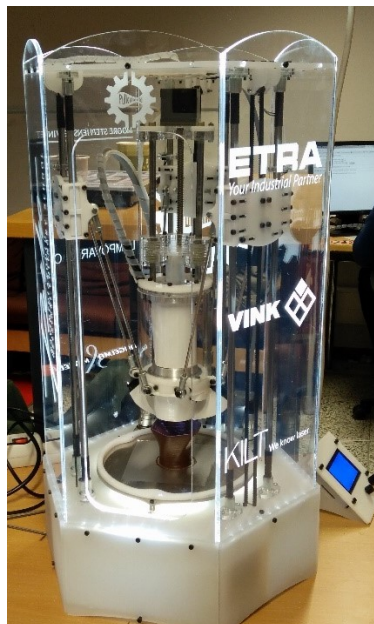
Etelä-afrikkalaista Hans Fouchea voidaan pitää eräänlaisena suklaan 3D-tulostuksen pioneerina. Hän teki suunnittelemlaan Cheetah-tulostimellaan jo vuonna 2000 tietokoneavusteisesti suklaamakeisia (kuva 10). Ilmeisesti tulostinta käytettiin alkuvaiheessa myös suklaan 3D-tulostamiseen, mutta kolmannesta ulottuvuudesta luovuttiin, jotta suklaiden valmistus olisi nopeampaa ja taloudellisesti kannattavampaa.

Cheetah-tulostimessa on kahdeksan tulostuspäätä. Y-akseli on liukuhihna, joka mahdollistaa sarjatuotannon tai hyvin pitkien kappaleiden tulostamisen. Suklaa ohjataan tulostuspäihin yhtä linjaa pitkin jollain melko järeällä pumpulla. Laite ei ole erityisen tarkka: suuttimet ovat isoja eikä suklaan virtausta voida hallitusti katkaista. Suklaata tulee tulostuksen aikana tulostuspäistä jatkuvalla syötöllä. Cheetah-tulostimen liukuhihna sekä 8-päinen tulostuspää ovat kuitenkin tuottavuuden kannalta erinomainen ratkaisu. Liukuhihnaa on myös sovellettu muovia tulostaviin 3D-tulostimiin onnistuneesti, esimerkkinä Black Belt 3D-tulostin. (3ders 2014; Fouche 3d Printing 2015)



Kuva 10. Hans Fouchen suklaata tulostava 8-päinen CheetaH 2D-tulostin. (3ders, verkkosivu)

Taulukossa on myös esillä Pullonkaulan 3D-suklaatulostin (kuva 11). Tulostuspään toiminta perustuu Choc Creatorin sekä 3Dragin tavoin ruiskuun, joka täytetään sulalla suklaalla ja ladataan koneeseen. Pullonkaulan 3D-suklaatulostimen kinemaattiseksi ratkaisuksi valikoitui kuitenkin muista taulukossa esitellyistä tulostimista poiketen kuitenkin Delta. Kinemaattisista ratkaisuista on kerrottu lisää alaluvussa 3.6.



Kuva 11. Pullonkaulan 3D-suklaatulostin.

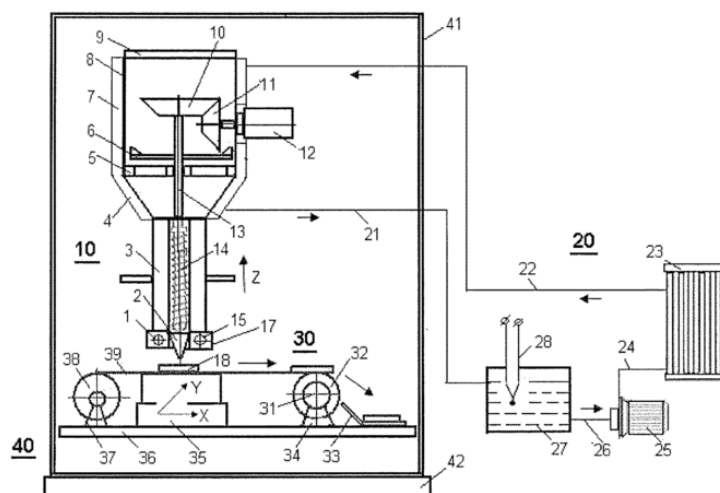
3D-suklaatulostimia on olemassa myös lukuisia muitakin kuin tässä kappaleessa esitellyt. Harrastelijapiireissä on kokeiltu erilaisia ratkaisuja suklaan tulostukseen mm. hammas-

pyöräpumppua, peristalttista pumppua sekä erilaisia avoimen lähteen nestemäisiä materiaaleja käsitteleviä tulostuspäitä (engl. paste extruder). Isoista verkkokaupoista, kuten Ebaysta, saattaa löytää myös kaupallisia suklaatulostimia, joiden toiminnasta saattaa olla vain erittäin vähän tietoa tarjolla.

3.2 Patenttitutkimus

Tässä alaluvussa esitellään lyhyesti kolme patenttia koskien suklaan 3D-tulostusta ja 3D-tulostimia. Patentissa käytetään hieman erilaista tapaa tulostaa temperoitua suklaata.

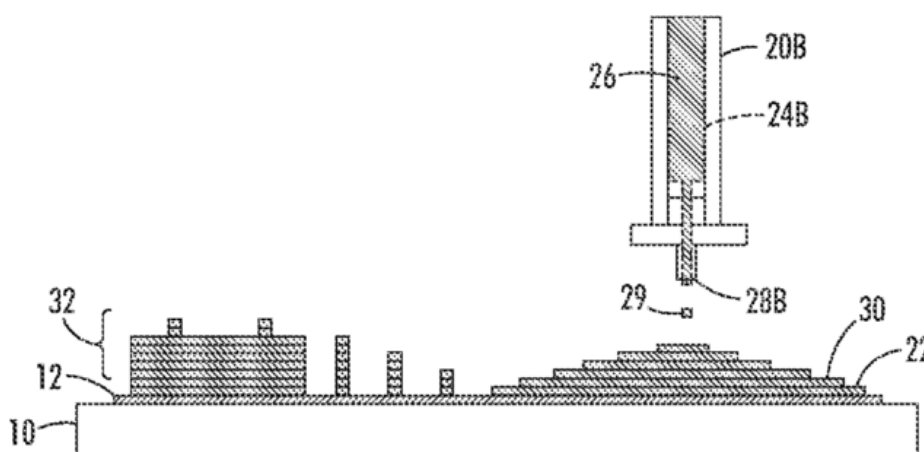
Porimyllä on patentti ruokaa, erityisesti suklaata, tulostavasta 3D-tulostimesta, josta tulostettava kappale voidaan automaattisesti poistaa filmirullan kaltaisen mekanismin avulla. Tulostus tapahtuu kahden telan välissä olevan taipuvan materiaalin päällä. Alusta voidaan rullata kappaleen valmistuttua toisen telan sisään, niin että valmis kappale tippuu valmiiden kappaleiden koteloon. Lisäksi patentissa on esitelty vesijäähdytetty suppilo, joka estää suppiloon lisätyn suklaarouheen lämpenemisen ja kasaantumisen suppilon suuhun tukkien materiaalin valumisen syöttöruuviin. (Wang *et al.* 2017)



Kuva 12. Porimyn patentoima kappaleen automaattinen poistaminen sekä suppilon vesijäähdytys. (Wang *et al.* 2017)

Patentoitujen ominaisuuksien avulla Porimy on onnistunut vähentämään suklaan 3D-tulostuksessa käsin tehtävää työtä. Ruiskuja ei tarvitse täyttää ja ladata koneeseen, eikä kappaleita tarvitse käsin poistaa tulostimesta ennen kuin uuden kappaleen tulostuksen voi aloittaa. Temperointiyksikköä Porimyn tulostimessa ei ole: suppiloon kaadettavan suklaarouheen on oltava hyvin temperoitua suklaata, jotta tulostetut kappaleet ovat onnistuneita. Temperointi tehdään siis suoralla menetelmällä eli varovasti lämmittämällä suklaarouhe alle V-muotoisten kiteiden sulamislämpötilan.

Xeroxin omistamassa patentissa on kuvattu menetelmä suklaan temperointiin 3D-tulostuksen aikana. Tulostettu suklaa temperoidaan käyttämällä alempana olevaa kerrosta siemenkiteenä. Tulostuspäästä tuleva suklaa voi siis olla sulaa temperoimattomaa suklaata, jonka viskositeetti ei kasva ajan funktiona. Kun temperoimaton suklaa asettuu temperoidun kerroksen päälle, V kidemuoto kopioituu siihen. Jähmettynyt kerros toimii taas siemenkiteenä seuraavalle kerrokselle. Patentissa käsitellään kattavasti myös muita mahdollisia keinoja temperoida suklaata 3D-tulostimessa. Alimpaan kerrokseen voi muun muassa saada halutun V kidemuodon temperoimalla suklaa suoraan lämpösäädeltävän tulostusalustan päällä. (Mantell *et al.*, 2014)



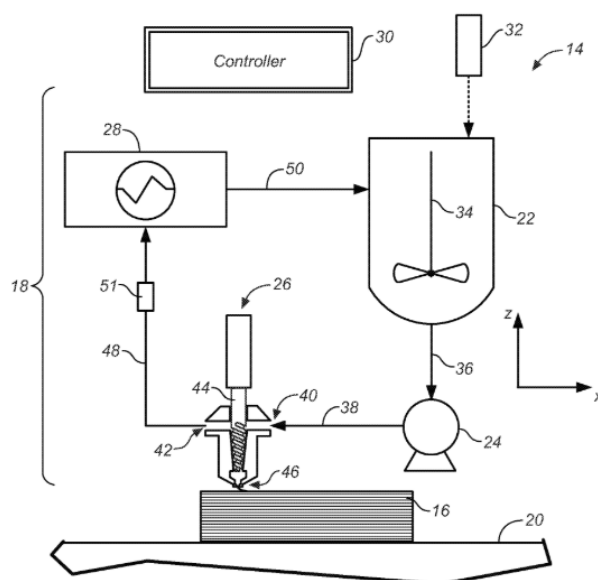
Kuva 13. Xeroxin patentoimassa menetelmässä suklaa voidaan säilöä sulana (26) ja alemmat kerrokset (22) voivat toimia siemenkiteinä päällimmäiselle kerrokselle (33). Lämmitettyä tai jäähdytettävää alustaa (10) voidaan hyödyntää pohjakerroksen (12) temperoinnissa. (Mantell *et al.* 2014)

Xeroxin patentti parantaa 3D-tulostimien toimintavarmuutta sekä vähentää käsin tehtävää työtä poistamalla tarpeen temperoida suklaata käsin. Koska kiderakenne kopioituu kerrokseen vasta materiaalin pursotuksen jälkeen, voidaan suklaa säilöä ja pursottaa temperoimattomana. Temperoimattoman suklaan viskositeetti ei kasva ajan funktiona, joten suklaata tarvitse vaihtaa koneeseen tietyin väliajoin ja kone toimii varmemmin ja tasaisemmin. On kuitenkin vaikea sanoa, kuinka hyvin kiderakenne kopioituu pursotettuun kerrokseen. Todennäköisesti mitä ohuempia kerroksia koneella pursotetaan, sitä paremmin kidemuoto kopioituu alla olevasta kerroksesta päällimmäiseen.

Xeroxin patenttia on vaikea valvoa, koska patentoitua menetelmää voi hyödyntää periaatteessa millä tahansa 3D-suklaatulostimella, jossa tulostuspään tai tulostusalustan lämpötilaa voi säätää. Miami Factory käyttää tulostuksen aikana 0.1 - 0.2mm kerroskorkeutta ja tulostaa erittäin pitkiä yli kolme tuntia kestäviä tulosteita aidolla tummalla suklaalla. Lisäksi laitteista kuvastusta videosta paljastuu, että tulostuspään lämpötila on reilu 35°C, joka on juuri yli V kiteiden sulamislämpötilan. (NTDTV, 2017) On siis mahdollista, että Miami Factory hyödyntää patenttia: ensimmäiset kerrokset tulostetaan temperoidulla suklaalla, jonka jälkeen tulostuspään lämpötila asetetaan niin korkeaksi, ettei suklaa enää

kiteydy tulostuspään sisällä, vaan saa tarvitsemansa kiteet suoraan alemmista kerroksista. Tämä on kuitenkin vain arvaus. Voi myös olla, että 3Drag tulostuspäässä riittää yksinkertaisesti vääntö temperoidun suklaan tulostamiseen ja tulostuspään kärjen lämmönsäätely on niin tarkka, ettei suklaa jähmety ja tuki kärkeä. Suklaa voi myös olla hieman viileämpää kuin 35°C, joka on vain termistorin mittaama lämpötila ruiskua ympäröivästä kotelosta.

Kolmas tässä työssä esitelty suklaan 3D-tulostusta koskeva patentti on Stratasys Inc:n omistama. Patentissa on esitetty 3D-suklaatulostin, joka mahdollistaa suklaan uudelleen temperoinnin sekä sopivan viskositeetin ylläpitämisen suoraan 3D-tulostimessa. Tulostimeen on rakennettu suklaata varten paluulinja tulostuspäästä suklaasäiliöön. Suklaa kiertää pumpun avulla tulostimessa kehää tulostuspään sekä suklaasäiliön välillä ja erillinen ruuvisyöttö tulostuspäässä annostelee vain osan kiertävästä suklaasta tulostettavan kappaleen päälle. Jos suklaan viskositeetti kasvaa liian suureksi, paluulinjalla oleva lämmitin pystyy sulattamaan osan tai kaiken suklaasta. Suklaasäiliössä täysin sulaneen suklaan päälle voidaan lisätä siemenkiteitä, jotka temperoivat suklaan uusiksi. Suklaasäiliössä suklaata myös sekoitetaan terän ja kaapimien avulla, jotta suklaa pysyy notkeana ja temperointi onnistuisi. Tarve uudelleen temperoida suklaa voidaan määrittää tarkkailemalla anturilla järjestelmässä kiertävän suklaan viskositeettia. Prosessi voidaan myös toistaa aina tietyn väliajoin, esimerkiksi 50 minuutin välein. Suklaan jatkuva kierto järjestelmässä vähentää myös suklaan viskositeettia suklaan tiksotrooppisen käyttäytymisen vuoksi. (Zimmerman *et al.* 2012)



Kuva 14. Stratasysin patentissa esitelty paluulinja (48) tulostuspäästä (26) lämmittimen (28) kautta suklaasäiliöön (22). (Zimmerman *et al.* 2012)

Stratasysin patentissa käydään läpi myös erilaisia kinemaattisia ratkaisuja esitetylle 3D-suklaatulostimelle. Tulostuspää voi muun muassa liikkua xy-tasossa ja tulostusalusta liikkua z-suunnassa. Tulostuspää voi olla myös kokonaan paikoillaan ja pelkkä alusta voi

liikkua jokaiseen suuntaan esimerkiksi portaalirobotti kaltaisella rakenteella tai rinnakkaisrakenteisella robotilla. Tulostusalustaa on myös mahdollista kallistaa, joka voisi helpottaa kaltevien rakenteiden tulostuksessa. Kinemaattisia ratkaisija on erikseen kommentoitu tässä työssä alaluvussa 3.6.

Myös Stratasyksen patentti pyrkii parantamaan suklaan 3D-tulostuksen toimintavarmuutta pitkien tulostuksien aikana sekä vähentämään käsin tehtävää työtä yhdistämällä temperointikoneen sekä 3D-tulostimen. Suklaan pitäminen jatkuvassa liikkeessä parantaa myös syöttöruuvin tarkkuutta, koska suklaa ei syöttöruuvin liikkeen alkaessa ole jämähtänyt paikoilleen, milloin se vastustaa enemmän liikettä.

3.3 Pumppuvaihtoehdot

Tässä alaluvussa arvioidaan erilaisia pumppuvaihtoehtoja tulostuspäähän suklaan annosteluun. Hyvä tulostuspää tuottaa mahdollisimman tasaisen, ennustettavan ja pulssittoman virtauksen. Yleisesti ottaen nestemäisiä materiaaleja tulostaessa kannattaa käyttää askelmoottorikäyttöisiä syrjäytyspumppuja (engl. positive displacement pump), koska niitä voidaan ohjata olemassa olevilla 3D-tulostusohjelmistoilla sekä ohjainten ajurit tukevat niitä suoraan. Syrjäytyspumppulla tarkoitetaan pumppua, joka teoriassa tuottaa moottorin kierrosnopeuteen nähden vakiovirtauksen riippumatta nesteen viskositeetista tai lämpötilasta tai painepuolella olevasta paineesta. Käytännössä kuitenkin vakiovirtausta on vaikea saavuttaa, koska syrjäytyspumput vuotavat aina jonkin verran painepuolelta imupuolelle. (Schmid 2013, s. 342) Erilaisten askelmoottorikäyttöisten syrjäytyspumppujen lisäksi alaluvussa myös esitellään pneumatiikkaan perustuva ruiskupumppu, jota käytetään yleisesti myös tulostuspäissä.

Alaluvussa tärkeänä lähteenä on käytetty Dries Verbruggen vuonna 2014 RepRap -lehteen kirjoittamaa artikkelia The Road to Better Paste Extrusion. Verbruggen kertoo artikkelissaan havaitsemiaan hyviä ja huonoja puolia eri pumpuista, joita hän on kokeillut erilaisia nestemäisiä materiaaleja, etenkin savea, tulostaessa.

3.3.1 Askelmoottorikäyttöinen ruiskupumppu

Taulukossa 4 esitellyistä 3D-suklaatulostimista Choc Creatorin, 3Dragin sekä Pullonkaulan 3D-suklaatulostimen tulostuspään toiminta perustuu askelmoottorikäyttöiseen ruiskupumppuun. Ruiskupumppua on käytetty harrastelijapiireissä jo pitkään erilaisten materiaalien 3D-tulostukseen: RepRap -sivuston ensimmäinen tulostuspää vuonna 2004 käytti ruiskupumppua ennen kuin filamenttiin perustuvat tulostuspäät alkoivat yleistyä harrastelijapiireissä. Lisäksi ensimmäisenä ruokatulostimena pidetty Fab@Home -tulostin käytti myös samaa mekanismia vuonna 2009.

Askelmoottorikäyttöisen ruiskupumpun hyvät puolet suklaan 3D-tulostuksessa ovat melko yksinkertainen mekaaninen toteutus, pulssiton virtaus, 3D-tulostusohjelmien ja

ajurien valmis tuki ja suklaasta likaantuvien osien vähyys. Eräs huono puoli ruiskupumpussa on, että tulostuspäästä tulee hyvin suurikokoinen. Tulostuspään on oltava ainakin yhtä korkea kuin ruiskun sylinteri sekä ulos vedetty mäntä - 60 ml ruiskulla tämä tarkoittaa jo ainakin 300mm korkeata tulostuspäätä. Verbruggenin mukaan, kun tähän lisätään suutin sekä moottori sekä voimanvälitys, voi tulostuspäästä tulla jopa 400mm korkea.



Kuva 15. Pullonkaulan 3D-suklaatulostimen tulostinpää on painava. Massa täytetyn ruiskun kanssa on noin 1.700kg.

Ongelma tulostuspään suuresta koosta voidaan välttää sijoittamalla ruiskupumppu erilliseen tulostuspäästä ja johtamalla tulostettava materiaali putkea pitkin tulostuspäähän. Tämä kuitenkin kuormittaa askelmoottoria enemmän, sillä kapea putki, jota pitkin materiaalia työnnetään, luo lisää vastusta. Lisäksi putkeen pitäisi lisätä lämmitys, jotta sillä voisi tulostaa suklaata.



Kuva 16. Ultimaker tulostimen suunniteltu Discov3ry tulostinpää. Ruiskupumppu on tilan säästämiseksi ja tulostinpään keventämiseksi sijoitettu erilleen tulostinpästä. (Structur3D Printing, verkkosivu)

Ruiskupumpun toisena heikkoutena Verbruggen mainitsee, että tulostettavan materiaalin määrä on ruiskuilla hyvin rajallinen. Mitä paksumpaa ruiskua käyttää, sitä epätarkemmaksi tulostus muuttuu ja sitä raskaammaksi syöttö käy moottorille. Ruiskun halkaisijan kasvattaminen kaksinkertaiseksi kasvattaa pursotettavan materiaalin määrän nelinkertaiseksi jokaista askelmoottorin askelta kohden. Isoilla ruiskuilla koituu lisäksi ongelmaksi hallita viskoelastisten materiaalien, kuten suklaan, syöttöä. Verbruggen on havainnut, että yli 20ml ruiskua käyttäessä tulostuspää vuotaa hetken tulostettavaa materiaalia, vaikka syöttö on katkaistu.

Choc Creator v2.0 Plus -tulostimessa on käytössä 30ml uudelleen käytettävä teräksinen ruisku. Tilavuus on riittävä noin tunnin kestäviin tulostuksiin. Suurempi ruiskun tilavuus on temperoitua suklaata perinteisin menetelmin tulostaessa luultavasti turhaa, koska viskositeetti kasvaa tunnin aikana niin paljon, että ruiskun suu menee tukkoon.

Ruiskupumpun huonoina puolina voidaan vielä mainita, että ruiskujen täyttö sulalla suklaalla lisää tulostukseen liittyvää manuaalista työtä. Materiaalin laittaminen ruiskuun tekee myös 3D-tulostuksesta panosprosessin: materiaalin loppuessa tulostus on keskeytettävä, jotta ruisku voidaan vaihtaa täyteen. 3Drag tulostimessa sekä Pullonkaulan 3D-tulostimessa käytettävät kertakäyttöiset muoviset ruiskut eivät ole myöskään ekologinen ratkaisu ja aiheuttavat lisäkulun suklaan 3D-tulostukseen. Toisin ajateltuna, ruiskut ovat kuitenkin erittäin hygieeninen ratkaisu ja helpottavat 3D-tulostimen puhtauden ylläpitoa.

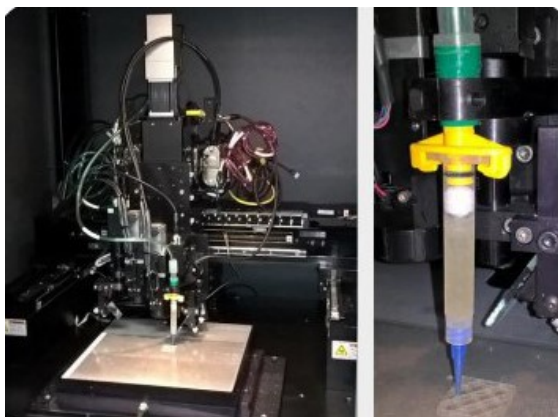
Verbruggen ehdottaa ruiskupumpun kehittämistä käyttämällä materiaalin syöttöön erittäin pientä 5 – 10 ml ruiskua, joka olisi mahdollista täyttää kesken tulostuksen automaattisesti sivusta. Kun materiaali ruiskussa loppuu, askelmoottori vetäisi männän ylös ja ruisku täyttyisi uudesta materiaalista.

3.3.2 Pneumaattinen ruiskupumppu

Ruiskupumppu voidaan toteuttaa myös pneumatiikalla. Askelmoottorin sijaan ruiskun mäntää painaa alas paineilma. Virtaus voidaan kytkeä päälle ja pois solenoidiventtiilin avulla poistamalla paine ruiskun männän takaa tai katkaisemalla materiaalin virtaus lähellä suutinta. Pneumatiikan etu verrattuna askelmoottorikäyttöiseen ruiskupumppuun on kevyempi ja vielä yksinkertaisempi rakenne. Tulostuspää voi koostua periaatteessa pelkästä ruiskusta, männästä sekä letkusta, jota pitkin johdetaan paineilmaa. Pneumatiikka skaalautuu myös askelmoottoria paremmin isoihin ruiskuihin. Työntävä voima kasvaa ruiskun halkaisijan mukana, sillä painetta vasten oleva pinta-ala on suurempi.

Pneumaattisen ruiskupumpun heikkoutena on, että materiaalin virtausta on vaikea hallita. Materiaalin virtaukseen vaikuttavat muun muassa ilmanpaine, materiaalin viskositeetti ja männän vastus. Verbruggenin mukaan virtaus saattaa vaihdella hieman jokaisella eri tulostuskerralla. Muun muassa männän vastus muuttuu, jos ruiskua käyttää uudestaan.

Verbruggenin mukaan teollisella tasolla pneumaattisen ruiskupumpun virtausta pystytään hallitsemaan. Tähän tarvittava suljettu säätöpiiri voisi koostua sähköisesti ohjatusta paineventtiilistä sekä tulostettavan materiaalin virtausta mittaavasta anturista lähellä suutinta. Virtausanturit ja digitaalisesti säädettävät venttiilit ovat kuitenkin kalliita komponentteja. Avoimen lähteen G-koodia tuottavat 3D-tulostusohjelmistot ja 3D-tulostimien ajurit eivät myöskään tue kyseisiä komponentteja.



Kuva 17. VTT:n ruoan 3D-tulostuksen tutkimiseen käyttämä testilaitteisto.
(mukaillen Sözer 2017)

Suklaata tulostaessa pneumatiikka on erittäin huono valinta, koska suklaan virtaus muuttuisi suklaan viskositeetin mukana ja virtauksen säätö olisi muutenkin epätarkkaa. Lisäksi tulostusta varten tarvittaisiin elintarvikekelpoista paineilmaa. Kompressorin pitäisi siis olla öljytön. Huolimatta pneumatiikan huonoista puolista, VTT on käyttänyt ruoan 3D-tulostusta koskeissa tutkimuksissaan paineilmaa. VTT:n testilaitteisto on myös hämmästyttävän suurikokoinen, vaikka paineilman harvoin vahvuuksiin kuuluu nimenomaan kevyt tulostuspään rakenne.

3.3.3 Ruuvi- ja epäkeskoruuvipumput

Ruuvipumpuista on olemassa hyvin paljon erilaisia variaatioita. Ruuvipumppu voi koostua vain yhdestä ruuvista sekä kotelosta, jolloin ruuvipumppua saatetaan kutsua Arkhimedeen ruuviksi, tai useammasta ruuvista ja kotelosta. Tässä työssä kaikkia eri variaatioita kutsutaan yhteisesti ruuvipumpuiksi, vaikka eri variaatioilla saattaa olla merkittäviä etuja ja haittoja toisiinsa nähden. Alaluvussa esitellään myös epäkeskoruuvipumppu.

Ruuvipumppujen toiminta perustuu kierteen (roottorin) ja kotelon (staattorin) väliin jäävään taskuun, jossa neste etenee, kun ruuvi kiertyy. Kun ruuveja on ruuvipumpussa useampia, yksi ruuveista saattaa pyörittää muita ruuveja. Kahta ruuvia käyttäessä ruuveilla ei välttämättä ole mekaanista kosketusta toisiinsa, vaan ruuveja pyörittävät erilliset rattaat. Ruuvipumpuissa roottorin ja staattorin tiiveys riippuu aineen viskositeetistä. Pitkillä ruuvipumpuilla pystytään siis luomaan parempi paine järjestelmään, koska tiivistäviä kohtia on enemmän. Ruuvipumpuilla voidaan tuottaa tasaista virtausta, mikä on tärkeä ominaisuus tulostuspäässä. (Nesbitt 2006, s. 34)

Verbruggenin mukaan tulostuspäissä ruuvipumpun etu verrattuna ruiskupumppuihin on lähellä tulostuspään kärkeä tapahtuva annostelu. Suklaan viskoelastisuus ei siis häiritse ruuvipumpun toimintaa yhtä paljon kuin se häiritsee ruiskupumpun toimintaa. Lisäksi ruuvipumppuun perustuva tulostuspää voi toimia potentiaalisesti jatkuvassa prosessissa panosprosessin sijaan, koska ruuvipumppu voi imeä nesteen avoimesta säiliöstä.

Jähmeän nesteen kulkeutumista ruuvipumpun imupuolelle voidaan avustaa paineilman tai toisen pumpun avulla. Etenkin ruuvipumpuilla, joissa on vaan yksi ruuvi, tämä saattaa kuitenkin johtaa tahattomaan nesteen valumiseen. Ruuvissa ei muodostu varsinaisia taskuja kotelon ja ruuvin välille, vaan materiaali pääsee liikkumaan paineen vaikutuksesta kierrettä pitkin, vaikka ruuvia ei kierretä. Eräs ratkaisu kyseiseen ongelmaan on käyttää epäkeskoruuvipumppua, jossa neste liikkuu staattorin ja roottorin välissä erillisissä ilmataskuissa. Epäkeskoruuvipumput tuottavat myös tasaista virtausta, mutta niiden toimintaa ei haittaa yhtä paljon pumpun imu- ja painepuolella oleva paine-ero.

Verbruggen päätyi tutkimuksissaan käyttämään tulostuspäässä epäkeskoruuvipumppua materiaalin annosteluun sekä pneumaattista ruiskupumppua materiaalin syöttämiseen epäkeskoruuvipumpulle. Tulostuspään 3D-tulostukseen tarvittavat tiedostot ovat ladattavissa Thingiverse -verkkosivustolta. Verbruggenin mukaan kyseinen ratkaisu on myös yleinen teollisuudessa. Samanlaiseen ratkaisuun on tulostinpäässään päätenyt myös esimerkiksi saksalainen yritys Viscotec. Verbruggen mainitsee artikkelissaan, että paineilmaa ei välttämättä tarvita, jos käytettävä materiaali on tarpeeksi juoksevaa. Esimerkiksi suklaa voisi valua käytettävään pumppuun hänen mukaan pelkästään painovoiman vaikutuksesta.



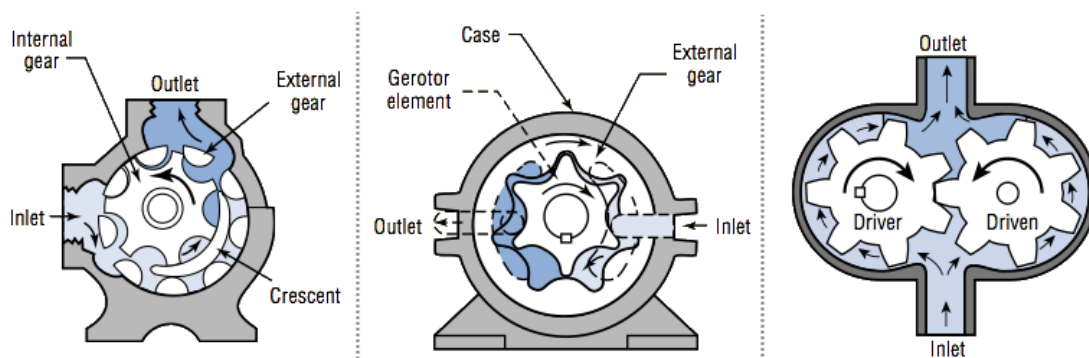
Kuva 18. Verbruggenin suunnittelema epäkeskoruuvipumppuun perustuva tulostuspää. (mukaillen Verbruggen 2014)

Verbruggen käytti savea tulostavassa tulostuspäässä muovista 3D-tulostettua epäkeskoruuvipumppua. Suklaan 3D-tulostukseen osa ei kelpaisi, sillä 3D-tulostettujen osien elintarvikekelpoisuus on hieman kyseenalainen asia - etenkin kun puhutaan lämpimästä elintarvikkeesta. Taulukossa 4 esiteltujen 3D-tulostimissa ei ole mainittu käytettävän epäkeskoruuvipumppua.

3.3.4 Hammaspyörä- sekä lohkoroottoripumput

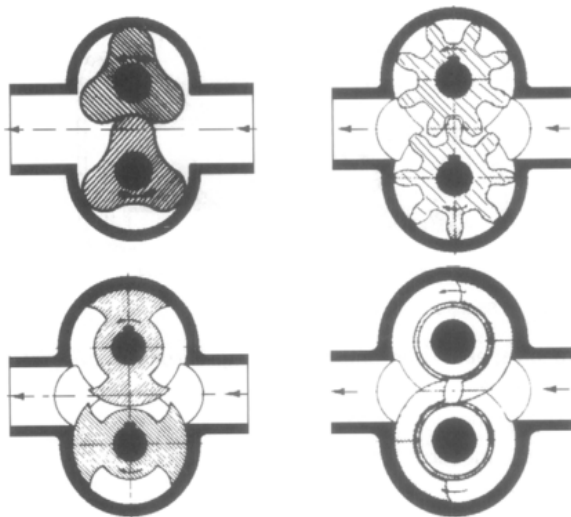
Hammaspyöräpumppuja on sekä sisä- että ulkoryntöisiä. Tavallisessa sisäryntöisissä hammaspyöräpumpussa pienempi epäkeskoisesti sijoitettu hammaspyörä pyörittää ulkopuolella olevaa isompaa sisäisesti hammastettua hammaspyörää. Hammaspyörien väliin jäävässä tilassa on lisäksi erotin tiivistämässä sisemmän ja ulomman hammaspyörien hampaita. Hammaspyörien pyöriessä neste kulkeutuu hampaiden välissä imupuolelta painepuolelle erottimen kummaltakin puolen. (Nesbitt 2006, s. 32) Gerotor -tyyppisissä sisäryntöisissä hammaspyöräpumpussa ulommassa hammaspyörässä on ainoastaan yksi hammas enemmän kuin sisemmässä ja hammaspyörät ovat mitoitettu niin, että erotinta ei tarvita hammaspyörien välille. (Stryczek *et al.* 2014)

Ulkoryntöisissä hammaspyöräpumppuissa on kaksi toisissaan kiinni olevaa hammaspyörää, joista toinen pyörittää toista. Neste liikkuu imupuolelta painepuolelle kotelon ja hammaspyörien hampaiden välissä. Painepuolella hampaat yhdistyvät ja pakottavat nesteen pihalle. Hammaspyöräpumpussa osa nesteestä joutuu kahden hammaspyörän väliin ja vuotaa voitelukanavia pitkin takaisin imupuolelle samalla voidellen hammaspyöräpumpun laakereita.



Kuva 19. Vasemmalta oikealle: sisäryntöinen hammaspyöräpumppu, gerotor -pumppu, ulkoryntöinen hammaspyöräpumppu. (Hydraulics & Pneumatics, verkkosivu)

Lohkoroottoripumppu muistuttaa toiminnaltaan ulkoryntöistä hammaspyöräpumppua. Siinä kaksi sopivan muotoista lohkoroottoria pyörivät kuljettaen nestettä itsensä ja ulkoreunan välissä imupuolelta painepuolelle. Lohkoroottorit eivät ole kuitenkaan mekaanisesti kiinni toisissaan, vaan niitä pyörittävät erilliset synkronoidut rattaat. Lohkoroottoripumppuja pidetään hygieenisinä sekä helppohuoltoisina pumppuvaihtoehtoina, jotka pysyvät potentiaalisesti tuottamaan tasaista virtausta ja kuljettamaan hellästi nesteitä lävitseen, esimerkiksi säilykkeitä, jossa on kokonaisia marjoja. Lohkoroottoripumppuihin on suunniteltu erilaisia roottoriprofiileja, jotka pumppaavat nestettä hieman eri tavoin. (Nesbitt 2006, s. 36–37)



Kuva 20. Erilaisia lohkoroottoripumpun roottoriprofiileja. (mukaillen Nesbitt 2006, s. 37)

Hammaspyöräpumppuja käytetään perinteisesti öljyn pumppaukseen, mutta myös jatkuvasti suklaateollisuudessa suklaan pumppaukseen. Suklaateollisuudessa käytössä on erityisesti sisäryntöiset hammaspyöräpumput sekä lohkoroottoripumput. Myös Verbruggen arvelee artikkelissaan, että hammaspyöräpumppu voisi toimia suklaan pursotuksessa. Hammaspyöräpumppu pystyy parhaiten pumppaamaan nesteitä, jotka toimivat samalla

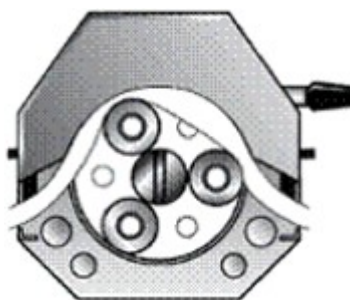
voiteluaineina. Karkeita kiintoaineita sisältävää seosta ei kannata hammaspyöräpumpulla pumpata, sillä hammaspyörät tukkiutuvat tai kuluvat kiintoaineista hyvin nopeasti. (Nesbitt 2006, s. 32)

Hammaspyöräpumppu tarjoaa samoja etuja suklaan 3D-tulostukseen kuin ruuvipumppu-kin. Suklaan annostelu voi tapahtua lähellä suutinta sekä suklaan 3D-tulostus voi tapahtua jatkuvana prosessina ilman suklaan täytöstä aiheutuvia katkoja. Hammaspyöräpumppujen pitäisi tuottaa melko myös pulssitonta virtausta riippuen hieman hammaspyörrien profiilista.

Erityisestä mielenkiintoa suklaan 3D-tulostuksen kannalta herättää hammaspyörä- sekä lohkoroottoripumpuissa esiintyvä nesteen kierto ja vuotaminen. Perinteisesti pumpun nesteen vuotamista painepuolelta imupuolelle voidaan pitää ei-toivottuna ilmiönä. Suklaan kanssa nesteen kiertäminen voisi olla keino levittää temperoidusta suklaasta siemenkiteitä täysin sulaan suklaaseen. Tämä voisi estää suklaan viskositeetin kasvun. Asiaa on pohdittu lisää yhteenvedossa.

3.3.5 Peristalttinen pumppu

Peristalttinen pumppu eli letkupumppu perustuu taipuisaan letkuun, jonka sisällä kuljete-
taan nestettä puristamalla letkua. Letkua voidaan puristaa esimerkiksi moottorin pyörit-
tämällä rullilla. Tämä saa materiaalin virtaamaan eteenpäin samalla tavalla kuin hammas-
tahna tulee pihalle hammastahnatuubista, kun tuubia puristetaan.



Kuva 21. Tavallisen letkupumpun toiminta perustuu joustavaan letkuun sekä letkua vasten painautuviin rulliin. (Manufacturing Chemist, verkkosivu)

Letkupumppuja on käytetty perinteisesti sovelluskohteissa, missä puhtaus on hyvin tärkeää - esimerkiksi ruoka-alalla tai farmaseuttisissa sovelluksissa (Manufacturing Chemist, verkkosivu). Letkun sisällä kulkevan materiaalin ei tarvitse koskea muihin osiin kuin letkuun, jonka voi helposti vaihtaa. Myös mekaaninen toteutus letkupumpulle on melko yksinkertainen. Huomioitavaa on kuitenkin, että letkut kuluvat letkupumpun sisällä, ja saattavat alkaa vuotamaan.

3D-tulostuksessa letkupumput eivät ole välttämättä paras ratkaisu ainakaan suklaan pur-sotukseen. Letkupumput tuottavat nimittäin hyvin pulssillisen virtauksen. Pulsseja pystytään kuitenkin tasaamaan esimerkiksi liittämällä kaksi tai useampi erivaiheissa puristet-tavaa letkua yhdeksi letkuksi. Suklaan kannalta haasteena on lisäksi suklaan juoksevana pitäminen letkuissa.

Hyvällä mekaanisella suunnittelulla letkupumppua voidaan soveltaa onnistuneesti 3D-tulostimen tulostuspäähän. Tästä esimerkkinä on Verbruggenin artikkelissakin esitelty Ian Festeun suunnittelema letkupumppuun perustuva tulostuspää, jossa kahta letkua pai-naa rullien sijaan askelmoottorin ohjaama ruuvi. (Festeu, 2011)

3.4 Syöttömoottorin takaisinkytkennän edut

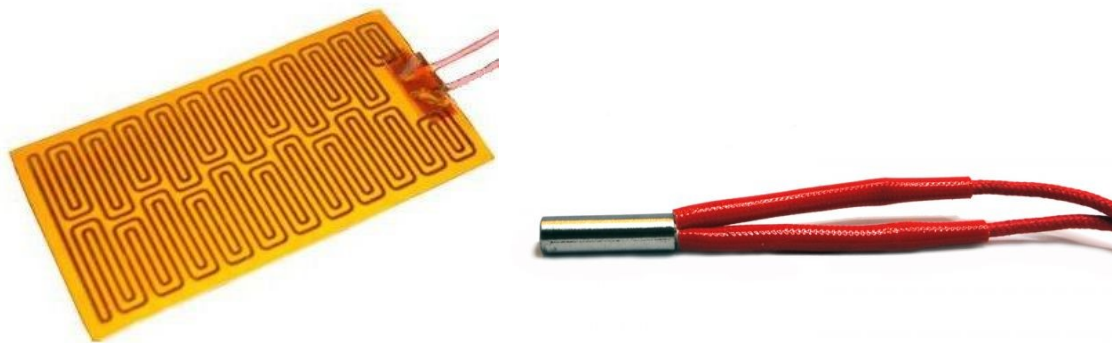
Työssä on aikaisemmin todettu, että temperoidun suklaan viskositeetti muuttuu ajan funk-tiona ja aiheuttaa mahdollisesti ongelmia 3D-tulostuksen aikana. Lisäksi ensimmäisessä luvussa todettiin, että eri suklaalaadut sekä -merkit eroavat viskositeetiltaan toisistaan. Suklaan viskositeettia olisi siis luultavasti hyvä mitata jollain tapaa ja mahdollisesti säätää lämpötilan avulla. Näin pystyttäisiin mahdollisesti tasaamaan tulostuslaatua eri suklaa-merkkien välillä tai ainakin saada arvokasta tietoa suklaan viskositeetista.

Yksi tapa seurata viskositeettia voisi olla mittaamalla syöttömoottorin tehonkulutusta, joka on suoraan verrannollinen moottorin vääntöön. Vaikka syöttömoottorista ei saisi edes kovin tarkkaa lukemaa, voisi tehonkulutuksen mittauksella seurata todennäköisesti ainakin yleisiä vikatilanteita esimerkiksi suklaan loppumista tai suuttimen tukkeutumista. Laadukkaimmat askelmoottoriohjaimet tukevat tehonmittausta (Trinamic, verkkosivu).

3.5 Lämmitys ja jäähdytys

Patenttitutkimuksessa alaluvussa 3.2 havaittiin, että suklaan 3D-tulostukseen on olemassa erilaisia lähestymistapoja. Ei voida mainita vain yhtä tapaa, miten suklaan lämmitys ja jäähdytys pitäisi järjestää. Tässä alaluvussa keskitytään lämmönsäätelyn tekniseen toteu-tukseen ja esitellään, miten eri kohteita on lämmitetty tai jäähdytetty eri 3D-suklaatulostimissa. Tarkastelun kohteena on tulostuspään toiminnan ja tulostuksen laadun kannalta oleelliset lämmitys- tai jäähdytyskohteet.

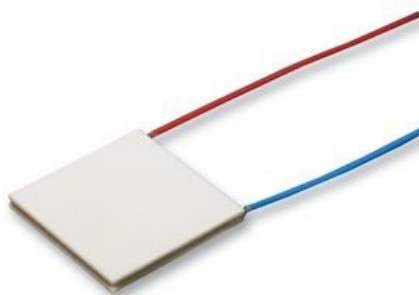
3D-tulostimien tulostuspäiden kärjen lämmitykseen käytetään tavallisesti keraamisia vas-tuksia, jotka lämpiävät nopeasti hyvin korkeisiin lämpötiloihin. 3D-suklaatulostimiin so-veltuu hyvin myös kokemuksen mukaan taipuisat lämmitysnauhat putkien tai isompien alueiden, esimerkiksi ruiskupumpun, tasaisen lämmitykseen. Vastuksien lämpötilaa mi-tataan 3D-tulostimissa tyypillisesti termistoreilla ja lämpötilaa säädetään PID-säädöllä.



Kuva 22. Tulostinpään lämmitykseen soveltuvia vastuksia. Vasemmalla 50W lämmitysnauha, oikealla 40W keraaminen vastus. (Alper, verkkosivu; E3D-Online.com, verkkosivu)

Alaluvussa 3.2 Stratasyksen patentissa esitellyssä 3D-tulostimessa suklaasäiliö sekä peristalttinen pumppu oltiin sijoitettu lämmitettyyn tilaan, johon puhallettiin kuumaa ilmaa. Kuuma ilma johdettiin myös letkun ympärille, jota pitkin suklaa kiersi järjestelmässä. Kuuma ilma poistui järjestelmästä juuri ennen kuin kiertävä suklaa palasi takaisin suklaasäiliön. Lämmitettyjä tiloja käyttämällä sekä kuuman ilman kierrolla estettiin siis suklaan jäähtyminen laajassa järjestelmässä. Kuumaa ilmaa tehdään tuulettimien ja lämmitävien elementtien avulla.

Peltier-elementti siirtää lämpöä elementin toiselta puolelta toiselle, kun siinä kulkee sähkövirta. Peltier-elementti voi toimia sekä lämmittimenä tai jäähdyttimenä riippuen sähkövirran kulkusuunnasta. Niinpä se on erityisen hyvä käyttötarkoituksessa, jossa lämpötilan on vaihdeltava nopeasti kuuman ja kylmän välillä. Stratasyksen patentissa esitellyn paluulinjalla olevan lämmittimen toiminta perustuu Peltier-elementtiin. Lämmittimen tehtävänä on nopeasti nostaa järjestelmässä kiertävän suklaan lämpötila yli kiteiden sulamislämpötilan, jonka jälkeen lämmitin jäähtyy takaisin suklaan tulostuslämpötilaan.



Kuva 23. Peltier-elementti. (Farnell, verkkosivu)

Peltier-elementtien huonot puolet ovat huono hyötysuhde sekä haastava säätäminen. Viileästä puolesta voidaan saada kylmempi jäähdyttämällä kuumaapuolta esimerkiksi tuulettimilla ja jäähdytysrivoilla. Hyötysuhdetta voidaan parantaa käyttämällä tasavirtaa. (Meerstetter Engineering 2017) Lämmitysvastuksia yleensä ohjataan käyttämällä pulssi-

leveysmodulointua jännitettä eli PWM-jännitettä (engl. pulse-width modulation). Pulssileveysmodulointu jännite luo epätasaisen virran, mutta sitä voi tasata muun muassa RC-piirillä Peltier-elementille sopivaksi. Peltier-elementeille voi myös ostaa valmiita säätöohjaimia, jotka pystyvät ajamaan Peltier-elementtejä tehokkaammin. Huomioitavaa on myös, että Peltier-elementit särkyvät helposti liiallisista lämpötilan vaihteluista. Niinpä Peltierin-elementin lämpötilaa kannattaa säätää maltillisesti.

Pullonkaulan 3D-tulostimessa on kokeiltu Peltier-elementtejä suklaan jäähdyttämisessä. Alumiinisen tulostusalustan alapuolelle asennettiin Peltier-elementti, joka jäähdytti tulostusalustan noin 18 - 19 °C lämpötilaan. Tulostusalustan jäähdytyksestä seurasi kuitenkin usein pohjan liiallinen viileneminen ja alimman kerroksen taipuminen ja irtoaminen tulostusalustasta (kuva 24).

Pullonkaulan 3D-tulostimessa tulostetun suklaan jäähdytys onnistui paremmin tulostuspäähän asennetuilla tuulettimilla, jotka puhalsivat ilmaa juuri tulostetun suklaan päälle. 3Drag tulostimessa käytetään jopa Peltier-elementeillä jäähdytettyä ilmaa tulostetun materiaalin paikalliseen jäähdytykseen.



Kuva 24. Jäähdytetty tulostusalusta aiheutti Pullonkaulan 3D-suklaatulostimella kappaleiden taipumista sekä irtoamista tulostusalustasta.

Cocojet, MMuse sekä 3D Food Printer tulostimissa on suljettu tulostuskammio. Tämä on todennäköisesti hyvä ratkaisu suojaamaan tulostetta ulkopuolisilta epätasaisilta ilmavirtauksilta sekä lämpötilan vaihteluilta. Kammion sisäpuolen ilmaa voidaan myös mahdollisesti tulostimissa säädellä. Mmusen sekä Cocojetin sivussa olevat tuuletusaukot viittaavat siihen, että tulostusalustan lävitse pakotetaan todennäköisesti Peltier-elementeillä jäähdytetty ilmanvirta.



Kuva 25. 3Drag 3D-suklaatulostimen jäähdytysjärjestelmä. (Landoni 2015, verkkosivu)

Alaluvussa 3.2 Porimyn patentissa esitellyssä 3D-tulostimessa suppiloa jäähdytetään nestejäähdytyksellä, jotta suppiloon lisättävä suklaarouhe ei kasaantuisi ja tukkisi suppilon-reikää. Neste jäähdytetään Peltier-elementillä, jonka kuumaa puolta vuorostaan jäähdytti jäähdytysrivat sekä tuuletin. 3Drag tulostimessa käytetään myös nestejäähdytystä, mutta eri tarkoitukseen. Tulosteen päälle puhallettava ilma jäähdytetään Peltier-elementeillä ja Peltier-elementtejä jäähdytetään nestejäähdytyksellä. Neste kiertää järjestelmässä 12V jännitteellä toimivan akvaariopumpun avulla ja neste jäähdytetään 3Drag-tulostimessa tuulettimien avulla (Landoni 2015, verkkosivu).

3.6 3D-tulostimen kinematiikan merkitys

Tulostuspään suunnitteluun vaikuttaa 3D-tulostimen kinematiikka. 3D-tulostimet ovat yleensä rakenteeltaan karteesisia robotteja tai rinnakkaisrakenteisia Delta-robotteja. Karteesisen robotin rakenne koostuu kolmesta toisiaan vastakkain olevasta lineaariakselista. Lähes kaikki 3D-suklaatulostimet ovat karteesisia robotteja. Rakenteen etuja ovat jäykkä rakenne sekä suuri työala.

Pullonkaulan 3D-suklaatulostimen kinemaattiseksi rakenteeksi valikoitui Delta. Delta-rakenne mahdollistaa robotille erityisen nopeat liikkeet ja jäykän rakenteen, jos manipulaattorilla on pieni inertia eli kyky vastustaa liikkeen suunnan muutosta. Suklaan tulostuksessa nopeudesta ei ole hyötyä, koska suklaalla kestää kauan jähmettyä. Lisäksi Pullonkaulan 3D-suklaatulostimen tulostuspää painaa noin 1,7 kilogrammaa ja se on hyvin korkea, mikä tekee siitä hyvin epävakaa. Delta-rakenteisen robotin heikkoutena on, että kaikilla rinnakkaisrakenteisilla roboteilla on omaan kokoonsa nähden pieni työala. Myös

kinematiikan kalibrointi on haastavampaa ja alttiimpi rakennusvirheille. Delta-rakenteisen 3D-tulostimen tulostuspäähän onkin erityisen hyödyllistä rakentaa automaattinen kalibrointi. Syy Delta-rakenteeseen Pullonkaulan 3D-suklaatulostimessa on puhtaasti visuaalinen – seikka, jota ei sovi kuitenkaan aliarvioida etenkin puhuttaessa suklaan 3D-tulostuksesta. Ulkonäön tärkeyden on myös huomionut esimerkiksi suunnittelutoimisto Michiel Cornelissen Ontwerpin kehittäessään konseptin XoCo 3D-suklaatulostimesta (Chang 2016; Michiel Cornelissen Ontwerp 2016). Pienenä etuna suklaan 3D-tulostuksessa Delta-rakenteella voidaan mainita, että tulostusalustassa ei ole lainkaan värinää, joka saattaa edesauttaa tiksotrooppisen suklaan asettumista.

Lähtökohtaisesti tulostuspään ei kannata olla kovin painava tai iso, koska se lisää tulostuspään epätarkkuutta ja kuormitusta askelmootoreille tulostuspään vaihtaessa nopeasti suuntaa. Jos tulostuspäästä tulee kuitenkin iso, kinematiikan voi kuitenkin suunnitella niin, että tulostuspää liikkuu mahdollisimman vähän tai pysyy jopa kokonaan paikoillaan. 3Drag tulostimessa tulostusalusta liikkuu sekä xy-suuntaan. Tulostuspää liikkuu ainoastaan kerroksen vaihtuessa vähän ylöspäin z-suuntaan. Sekä karteesisella portaalirobotilla että rinnakkaisrakenteisella robotilla on myös mahdollista kiinnittää tulostuspää kokonaan paikoilleen ja liikutella pelkästään tulostusalustaa xyz-suunnassa tulostinpään alla. Tästä esimerkkinä on DeltaBots yrityksen suunnittelema 3D PotterBot Clay 3D Printer, joka on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. 3D PotterBot Clay 3D Printer. (Rich, 2015)

Stratasyksen omistamassa patentissa mainitaan, että suklaan 3D-tulostutuksessa voisi olla myös erityistä hyötyä lisätä 3D-tulostimeen enemmän vapausasteita, niin että tulostusalustaa voisi kallistaa. Tämä mahdollistaisi hyvin kaltevien pintojen tulostamisen ilman tukimateriaalin käyttämistä. Ilmaisisissa 3D-tulostusohjelmistoissa ei kuitenkaan ole tukea

useammalle vapausasteelle kuin kolmelle, joten ainakaan harrastelijapiireissä 5-akselista suklaan tulostusta ei todennäköisesti hetkeen tulla näkemään.

3.7 Materiaalit

Elintarvikkeita käsittelevälle tulostuspäälle joudutaan asettamaan erityisiä vaatimuksia. EU:n asetuksessa (1935/2004) säädetään yleisiä periaatteita kontaktimateriaaleille eli materiaaleille, jotka voivat joutua elintarvikkeiden kanssa kosketukseen. Asetusta suoraan lainaten - kaikkien elintarvikkeiden kanssa suoraan tai välillisesti kosketukseen joutuvien materiaalien tai tarvikkeiden on oltava riittävän inerttejä, jottei aineita pääse siirtymään elintarvikkeeseen sellaisia määriä, jotka voivat vaarantaa ihmisten terveyden, aiheuttaa sopimattomia muutoksia elintarvikkeen koostumuksessa tai heikentää sen aistinvaraisia ominaisuuksia. Lisäksi EU:n asetuksessa (2023/2006) säädetään velvoitteita kontaktimateriaalien ja niistä tehtyjen tarvikkeiden valmistajille, kuten esimerkiksi tehokkaan ja dokumentoidun laadunhallintajärjestelmän laatiminen sekä sen noudattaminen ja valvonta. EU:n lainsäädännön lisäksi EU-maissa on myös kansallisia kontaktimateriaaleihin ja elintarvikkeisiin liittyviä lakeja. Esimerkiksi Suomessa lain mukaan kaikkien kontaktimateriaalitoimijoiden on tehtävä ilmoitus toiminnastaan kunnalliselle elintarvikeviranomaiselle. Kontaktimateriaalien lainsäädäntöön Suomessa kannattaa perehtyä Eviran kotisivuilla. (Parlamentti *et al.* 2004; Yhteis *et al.* 2006; Evira 2018)

Pohjoismaiden ministeriöneuvoston rahoittamassa julkaisussa annetaan ohjeita metallien käytöstä kontaktimateriaaleina. Metalliset kontaktimateriaalit ovat tyypillisesti pinnoitettuja. Pinnoittamattomista metalleista voi korroosion seurauksena irrota haitallisia ioneja kosketuksissa olevaan elintarvikkeeseen. Emäksiset tai happamat elintarvikkeet lisäävät korroosion riskiä. Suklaassa lieenee riski, sillä se on lievästi hapan ruoka-aine. (Beckett *et al.* 2009, s. 173) Kontaktimateriaalista ei saisi vapautua etenkin erityisen haitalliksi luokiteltuja raskasmetalleja - yleisesti ottaen kadmiumia, lyijyä ja elohopeaa. (Cederberg *et al.* 2015, s. 15,20)

Asetuksen 1935/2004 mukaan valmistajan pitäisi pystyä saamaan toimittajalta tieto kontaktimateriaalin elintarvikekelpoisuudesta. Käytännössä tämä tekee haasteelliseksi esimerkiksi Kiinasta tilattujen suuttimien käyttämisen suklaan 3D-tulostuksessa, jos tulostettu suklaa tarkoitetaan syötäväksi.

Tulostuspään suunnittelun kannalta olennaisia ominaisuuksia metallille on elintarvikekelpoisuuden lisäksi työstettävyys, tiheys ja lämmönjohtavuus. Oleellisia ominaisuuksia ovat lisäksi hinta ja saatavuus. Seuraavaksi on tarkasteltu teräksen, alumiinin, kuparin sekä messingin erityisiä ominaisuuksia:

- **Ruostumaton teräs** on yleisin kontaktimateriaalina käytetty metalli. Se on painavaa (tiheys noin $7,7 - 7,9 \text{ kg/dm}^3$) ja se kestää kulumista ja korroosiota. Ruostumattoman teräksen korroosion kestävyys johtuu sen sisältämästä kromista. On

olemassa eri teräslajeja, muun muassa austeniittiset, ferriittiset ja martensiittiset ruostumattomat teräkset, joilla on hieman eri ominaisuudet. Austeniittinen ruostumaton teräs on kaikista yleisin käytetty kontaktimateriaalina helpon työstettävyyden ja hyvän korroosion kestävyys takia. (Cederberg *et al.* 2015, s. 61–63) Ruostumattomasta teräksestä tehdään 3D-tulostimiin kestäviä suuttimia. Ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus on merkittävästi huonompi kuin kuparin tai messingin. (Mensley 2018, verkkosivu)

- **Alumiinia** käytetään paljon esimerkiksi kattiloissa ja tölkeissä. Alumiini on usein pinnoitettu esimerkiksi teflonilla. Emäksisten, happamien tai suolaisten ruokien säilömistä tai prosessointia ei suositella pinnoittamattomassa alumiinissa. (Cederberg *et al.* 2015, s. 25) Alumiinin erityispiirteitä ovat helppo työstettävyys, keveys (tiheys $2,7 \text{ kg/dm}^3$) ja hyvä lämmönjohtavuus. Hyviä puolia ovat myös edullisuus ja helppo saatavuus.
- **Kuparia** on käytetty perinteisesti suklaateollisuudessa kontaktimateriaalina. Se on muun muassa erittäin painavaa (tiheys $8,96 \text{ kg/dm}^3$), hyvä sähkönjohde sekä alumiinia parempi lämmönjohde. Kupari on altis korroosiolle, eikä sitä pinnoittamattomana suositella kontaktimateriaaliksi. Kattiloissa ja ruokailuväleissä käytetty kupari pinnoitetaan yleensä tinalla tai ruostumattomalla teräksellä (Cederberg *et al.* 2015, s. 33). 3D-tulostimien suuttimia tehdään nykyään täydestä kuparista erinomaisen lämmönjohtamiskyvyn takia. (Mensley 2018, verkkosivu)
- **Messinki** on yleisin ja edullisin 3D-tulostimien suuttimien materiaali. Messinki on kuparin ja sinkin seos. Messinki on melko pehmeä materiaali, minkä takia messinkisillä suuttimilla ei suositella erityisen hankaavien materiaalien tulostusta. (Mensley 2018, verkkosivu) Messinki voi sisältää lyijyä, minkä takia messinkisiä suuttimia ei suositella käytettävän kontaktimateriaalina.

Edellä luetelluista materiaaleista varmin ratkaisu on käyttää ruostumatonta terästä kontaktimateriaalina suklaan kanssa. Sopivalla tavalla pinnoitettuna on myös vaihtoehtoina muut luetellut metallit. Raa'an kuparin ja kupariseosten käyttäminen kontaktimateriaalina voi olla sallittua joillekin ruoka-aineille, mutta soveltuvuus pitää tarkistaa aina toimittajalta. Voidaan myös kiistellä, voiko 3D-tulostetun suklaan mukana kantautuvat aineet tuottaa terveydelle vaaraa, koska syötävät määrät ovat niin pieniä – kunhan kantautuvat aineet eivät ole raskasmetalleja.

Karheat vaikeasti pestävät pinnat ovat erinomainen kasvualusta mikrobeille. Kontaktimateriaalin pinnanlaadun on siten tärkeä olla sileä ja helposti puhdistettava helpottamaan ruoan tuottajan tehtävää pitämään kontaktimateriaali hygieenisenä. Ruoan tuottajat ovat vastuussa asianmukaisesta kontaktimateriaalien käsittelystä ja säilömisestä (Cederberg *et al.* 2015, s. 20).

EU on säätänyt erikseen muovisia kontaktimateriaaleja varten asetuksen 10/2011. Asetuksen mukaan polymeerit ovat sellaisenaan melko inerttejä, eivätkä ne usein suurikoko-

sina molekyyleinä imeydy kehoon ja aiheuta vaaraa. Terveysriskin aiheuttavat pienet monomeerit, jotka eivät ole reagoineet täydellisesti, sekä muoviin lisätyt lisäaineet. Asetuksesta 10/2011 löytyy muun muassa täydellinen luettelo EU:n alueella hyväksytyistä lisäaineista ja monomeereistä sekä ohjeita muovien testaukseen riskiarviointia varten.

Erityisen hyödyllisenä muovina kone- sekä elintarviketeollisuudessa voidaan pitää polyasetalia eli POM C-muovia. Se on lujaa ja joustavaa, sillä on hyvät liukuominaisuudet sekä sitä on helppo työstää mekaanisesti sekä laserilla. Koneteollisuudessa POM C:tä käytetään muun muassa hammaspyörinä ja liukulaakereina sekä monina muina komponentteina. POM C-muovi soveltuu erinomaisesti myös elintarvikkeellisuuteen: se on helppo puhdistaa eivätkä puhdistusaineet vaikuta materiaaliin. (Vink Finland Oy 2016b)

Akryyliä eli PMMA-muovia käytetään yleensä 3D-tulostimissa oletettavasti helpon saatavuuden, visuaalisten ominaisuuksien sekä helpon lasertyöstettävyyden vuoksi. Akryyli on jäykkä, kova ja hauras materiaali ja se naarmuuntuu helposti. Vink Finland Oy:n mukaan myös akryyliä voidaan käyttää myös elintarviketeollisuudessa. (Vink Finland Oy 2016a)

3D-tulostettujen muoviosien käyttämisessä kontaktimateriaalina pitää olla tarkkana. Vaikka jotkut filamentit voivat olla luokiteltu turvallisiksi kosketukseen joidenkin ruokien kanssa, tulosteiden karhea pinta on erinomainen kasvualusta mikrobeille. (Locker 2017, verkkosivu) Suomessa on lainsäädännössä kevennys 3D-tulostettujen materiaalien tulostukseen: Suomessa ei tarvitse rekisteröityä kontaktimateriaalitoimijaksi 3D-tulostessaan kontaktimateriaaleja, jos noudattaa tulostaa tulostimen sekä raaka-aineiden toimittajan tarkkoja ohjeita tarkasti. Ohjeet tulee sisältää eri tulostusasetusten lisäksi maininnan käytettävästä raaka-aineen sekä kuvan tuotteesta, jonka valmistus on todettu turvallisiksi. (Virtanen & Kaiponen 2018, s. 13)

Kaiken kaikkiaan materiaalien fysikaalisten ominaisuuksien lisäksi ruokaa tulostavan tulostuspään materiaalien terveydelliset vaikutukset ja lainsäädäntö on otettava huomioon. Materiaalin soveltuvuus kontaktimateriaaliksi on aina tarkistettava toimittajalta. Kontaktimateriaalien on oltava jäljitettävissä ja tarpeen tullen kontaktimateriaalitoimijoiden on pystyttävä esittämään dokumentaatiota raaka-aineista ja tuotantoprosesseista. Jos Suomessa ryhtyy kontaktimateriaalitoimijaksi esimerkiksi alkamalla rakentamaan kaupallisia 3D-suklaatulostimia, pitää toiminnastaan tehdä ilmoitus kunnalliselle elintarvikeviranomaiselle.

4. PARAMETRIT

Parhainkaan tulostuspää ei tuota hyvää jälkeä, jollei 3D-tulostinta ajeta sopivilla asetuksilla. 3D-tulostetun kappaleen pitäisi vastata digitaalista mallia mahdollisimman tarkasti. Tässä luvussa käsitellään lyhyesti suklaan 3D-tulostuksen kannalta oleellisia parametrejä. Aihetta käsitellään suppeasti, koska työn tarkoitus on tutkia tulostuspään mekaanisia ratkaisuja eikä niinkään optimaalisia tulostusasetuksia. Täydelliset tulostusasetukset ja lämpötilat ovat riippuvaisia tulostuspäästä sekä tavasta, jolla kappale halutaan tulostaa. Tyyppillisistä suklaan työskentelylämpötiloista oli yhteenveto alaluvussa 2.5.

Suklaan 3D-tulostuksesta on olemassa tieteellisiä julkaisuja. Choc Edgen perustajajäsen Liang Haon sekä kumppanien tekemän tutkimusten (Hao *et al.* 2010) perusteella suklaan 3D-tulostuksen tarkkuuteen vaikuttavat seuraavat parametrit:

- Suuttimen etäisyys pinnasta
- Suuttimen reiän halkaisija
- Tulostuspään nopeus
- Pumpun tuottama virtaus

Lisäksi Mantihal ja kumppanit ovat tutkineet Porimy 3D-suklaatulostimella erilaisten muotojen vaikutusta tulosteiden tarkkuuteen sekä mekaanisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksen mukaan tukeva ristikkorakenne teki tulosteista kestävämpiä sekä geometrisesti tarkempia. (Mantihal *et al.* 2017) Pullonkaulan 3D-tulostimen testeissä on havaittu, että tulostuspään lämpötilalla ja käytetyllä suklaalla ja jäähdytyksellä on myös suuri merkitys tulosteen onnistumisen kannalta. Pullonkaulan testejä ei ole tarkasti dokumentoitu.

Suklaan jäähdytyksen tarve kasvaa mitä enemmän pumppu tuottaa virtausta, mitä juoksevampaa suklaa on ja mitä nopeampaa kerroksia halutaan muodostaa toistensa päälle. Suklaan pitää jäähtyä riittävän nopeasti, jotta pursotettu materiaali pysyisi kasassa ja jotta se pystyisi muodostamaan itseään kannattavia kerroksia. Liian hidas jäähtyminen aiheuttaa seinämien kaltevuutta sekä lisäksi tulostetuista kappaleista voi tulla matalampia mitä piti, koska alemmat kerrokset leviävät ylempien kerroksien painosta.

G-koodin tuottavat 3D-tulostusohjelmistot laskevat usein automaattisesti pumpun tuottaman virtauksen tulostuspään nopeuden, filamentin paksuuden ja kerrokskorkeuden mukaan. Laskukaavoissa voi olla ohjelmistojen välillä pientä eroa, minkä takia eri ohjelmistot tuottavat hieman eri jälkeä. Laskukaavat on suunniteltu muovin tulostukseen. Kokeimuksen mukaan Pullonkaulan 3D-suklaatulostimella pumpun syöttöä on joutunut kasvattamaan pienellä kertoimella Simplify3D-ohjelmistoa käyttäessä.

5. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin suklaan käyttöä lisäävässä valmistuksessa pursotusmenetelmällä sekä tulostinpään suunnittelua. Työssä perehdyttiin suklaan materialistisiin ominaisuuksiin sekä markkinoilla olevien 3D-suklaatulostimien teknisiin ratkaisuihin sekä aiheeseen liittyviin patentteihin ja tutkimuksiin. Työ sisälsi myös lyhyen katsauksen suklaan 3D-tulostuksen parametreihin.

Alaluvussa 2.5 tehtiin yhteenveto suklaasta 3D-tulostusmateriaalina. Merkittävimpiin seikkoihin kuuluvat suklaan polymorfia, temperointi sekä temperoidun suklaan viskositeetin muuttuminen ajan funktiona. Suklaa on polymorfinen aine, joka voi kiteytyä olosuhteista riippuen useampaan eri kidemuotoon. Kidemuoto V on suklaateollisuudessa tavoitelluin, koska se antaa suklaalle parhaimman kiillon, rapean suutuntuman sekä hyvän sulamislämpötilan ja säilyvyyden. Temperoinnilla pyritään saamaan aikaan sulaan suklaaseen riittävän paljon V muotoisia kiteitä ja vaikuttamaan suklaan työstettävyyteen. Temperoidun suklaan käyttäminen aiheuttaa kuitenkin haasteita pursotuksessa, koska suklaan viskositeetti kasvaa ajan funktiona kiteiden levitessä. Tämä saattaa johtaa muun muassa suuttimen tukkeutumiseen.

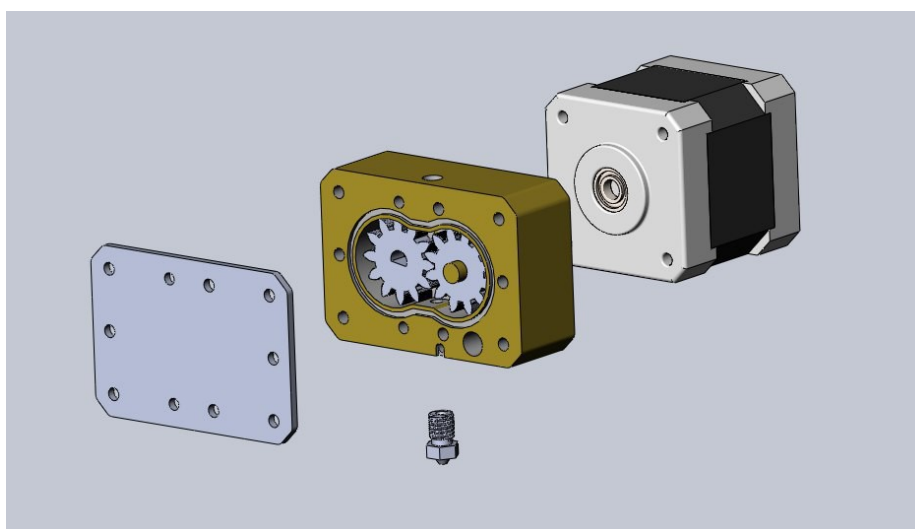
Työssä esiteltiin kaksi eri patenttia, jotka käsittelevät miten temperoitua suklaata voidaan tulostaa, ilman että viskositeetin kasvaminen koituu ongelmaksi. Stratasyn patentissa esitellään suklaata tulostava 3D-tulostin, jossa suklaalle on rakennettu paluulinja tulostuspäästä takaisin suklaasäiliöön. Paluulinjan loppupäässä on lämmitin, joka mahdollistaa temperoidun suklaan kiteiden määrän säätelyn. Osa V-muotoisista kiteistä voidaan sulattaa suklaan kiertäessä lämmittimen ohi kesken tulostuksen. Xeroxin patentti taas esittelee menetelmän, jossa suklaa voidaan temperoida pursotuksen jälkeen hyödyntämällä jo tulostetun kappaleen kiderakennetta: Temperoidun suklaan kiderakenne leviävää alemmasta kerroksesta päällimmäiseen kerrokseen. Xeroxin patenttia on vaikea valvoa, koska sitä voidaan hyödyntää periaatteessa millä tahansa 3D-suklaatulostimella, missä tulostuspäätä voidaan lämmittää.

3D-suklaatulostimien määrä on kasvanut markkinoilla. Suklaata pursottava tulostuspää toteutetaan tavallisesti joko askelmoottorikäyttöisellä ruiskupumpulla tai ruuvipumpulla. Yksinkertaisin ja hygieenisin ratkaisu on käyttää tulostuspäässä askelmoottorikäyttöistä ruiskupumppua. Ratkaisu ei ole kuitenkaan täydellinen. Yksi ruiskupumpun ongelmista on työläs esivalmistelu. Suklaa joudutaan sulattamaan ja temperoimaan ensiksi ja lataamaan ruiskuun käsin. Askelmoottorikäyttöiset ruiskupumput ovat myös rakenteeltaan hyvin suuri kokoisia, vaikka ruiskut eivät edes sisällä erityisen paljon suklaata. Suklaata ei voida täydentää ruiskuun kesken tulostuksen. Ruuvipumppua mahdollistaa suklaan täydentämisen tulostimeen kesken tulostuksen sekä myös suklaan lisäämisen rouheena. Ruuvipumppu on kuitenkin usein vaikeampi pitää puhtaana kuin ruiskupumppu.

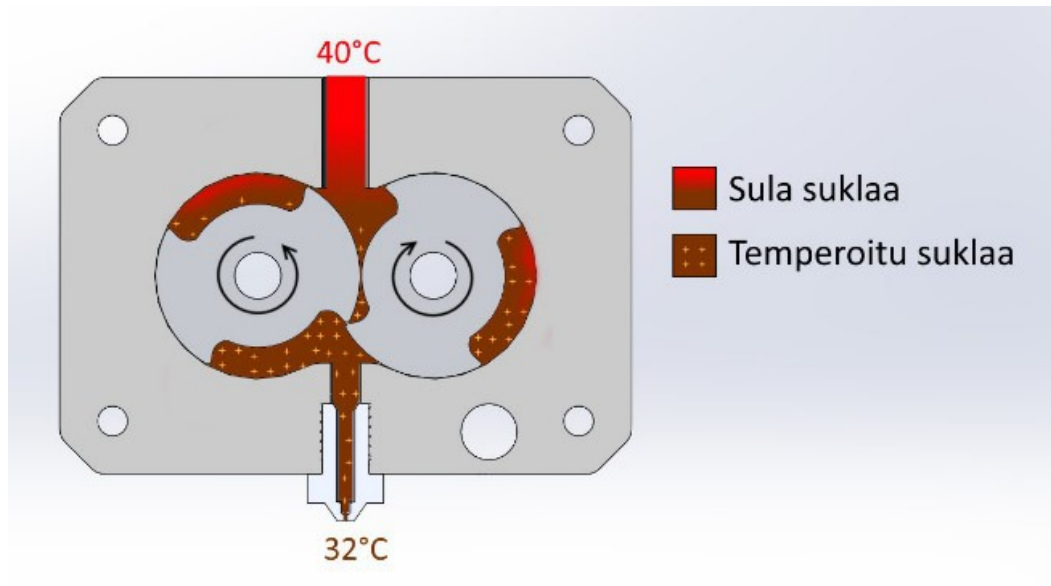
Alaluvussa 3.3 tutkittiin eri pumppuvaihtoehtoja, jotka voisivat soveltua suklaan tulostukseen. Erityisestä mielenkiintoa pumpuista herätti hammaspyörä- sekä lohkoroottoripumput. Hammaspyörä- ja lohkoroottoripumpuissa esiintyy pumpattavan nesteen kiertoa painepuolelta imupuolelle, joka on tyypillisesti vältettävä ilmiö. Suklaan pursotuksessa nesteen kierto voisi tarjota kuitenkin keinon pitää suklaan viskositeetti hallinnassa. Lisäksi ruuvipumpun tavoin hammaspyörä- sekä lohkoroottoripumppuihin voidaan täydentää suklaata kesken tulostuksen ja lisätty suklaa voi olla pelkkää rouhetta, joka sulatetaan koneen sisällä. Lohkoroottoripumput voidaan suunnitella myös helposti puhdistettaviksi.

Esitän seuraavaksi konseptin temperoitua suklaata tulostavasta tulostuspäästä (kuvat 27, 28 ja 29). Lohkoroottori- tai hammaspyöräpumpussa voitaisiin käyttää tulostuksen alussa sekä imu- että painepuolella temperoitua suklaata. Ennen kuin viskositeetti nousee liian suureksi, imupuolelle saapuva suklaa voitaisiin lämmittää yli suklaan kiteiden sulamislämpötilan. Painepuolelta imupuolelle vuotava suklaa voisi siementää imupuolen suklaan V-muotoisilla kiteillä. Päätyessään painepuolelle suklaa olisi uudelleen temperoitunutta (kuva 28). Temperoidun suklaan kierrättäminen sekä imupuolen suklaan siementäminen V-muotoisilla kiteillä jatkuisi niin pitkään kuin tulostus on käynnissä. Hammaspyöräpumpuissa suklaan vuotoa voisi tahallisesti lisätä tekemällä pienen uran kohtaan, missä rattaat yhdistyvät tai lisäämällä välyksiä. Lohkoroottiripumpuissa lohkot voidaan taas suunnitella tavalla, joka erityisesti lisää imupuolelta painepuolelle kulkeutuvan suklaan määrää.

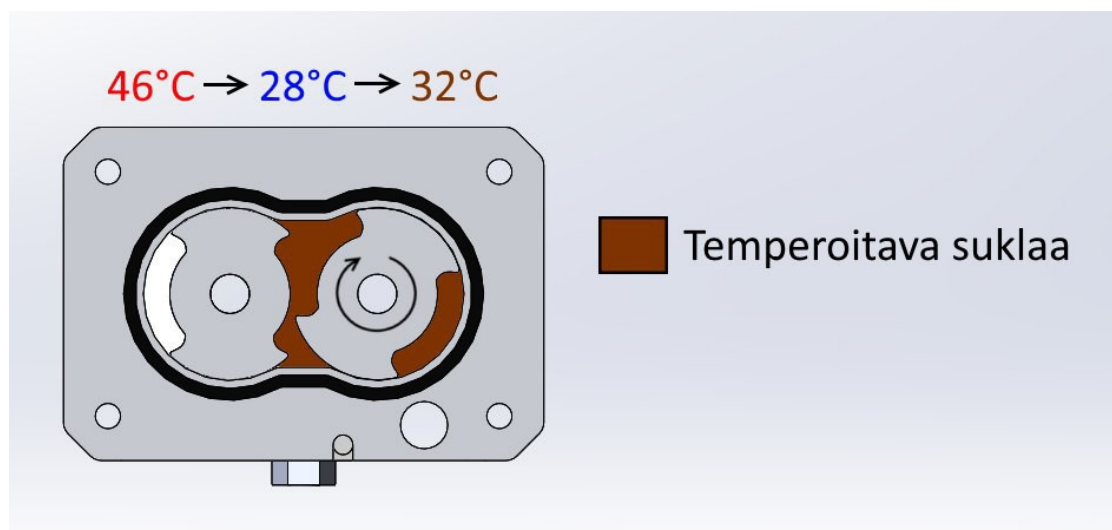
Lohkoroottipumppua voisi käyttää myös suklaan temperointikoneena ajamalla lohkoja epätahdissa, milloin lohkot ainoastaan sekoittaisivat suklaata (kuva 29). Tämä tarvitsisi kytkimen, joka erottaa lohkoja ajavat rattaat toisistaan, tai kahden servomoottorin käyttämisen, jotka kumpikin ohjaavat omaa lohkoaan. Pumpussa käytettävään moottoriin tai moottoreihin voisi lisätä virranmittauksen suklaan viskositeetin tarkkailuun ja arviointiin.



Kuva 27. *Konsepti hammasrataspumppuun perustuvasta tulostuspäästä.*



Kuva 28. Konsepti lohkoroottoripumppuun perustuvasta tulostuspäästä. Kuvassa havainnollistettu jatkuvatoiminen temperoidun suklaan tulostaminen.



Kuva 29. Lohkoroottoripumpulla suklaan temperointi. Vaatimuksena on, että lohkoja pystyy ajamaan erikseen.

Jatkotutkimukseksi jää rakentaa esiteltyt tulostinpäät sekä testata konseptia käytännössä. Konseptin suurin ongelma on, että syöttöpuolelta imupuolelle palautuvan suklaan määrä on vaikea saada sopivaksi ja palautuva suklaa ei välttämättä ehdi siementää imupuolen suklaata kunnolla ennen kuin suklaa päätyy painepuolelle. Suuttimeen on myös vaikea saada aikaan riittävän suurta painetta, jos suuri osa painepuolen suklaasta ohjataan takaisin imupuolelle. Epäilemättä lohkojen tai hammaspyörien muotojen merkitys tulee olemaan suuri.

Seuraavaksi vielä muita havaintoja 3D-suklaatulostimen rakentamisesta. Alaluvussa 3.5 tutkittiin suklaan lämmitystä ja jäähdytystä. Tulostusalue kannattaa todennäköisesti sulkea kotelon sisälle – kappaleen pitää jäähtyä tasaisesti ja kotelo suojaa kappaletta ympäröiviltä ilmavirtauksilta. Suklaan jäähtymistä voidaan tehostaa säätelemällä kotelon sisäistä lämpötilaa tuulettimilla sekä Peltier-elementeillä. Tulostusalueen jäähdytys on huono idea, koska se saa kappaleen jäähtymään liian voimakkaasti pohjasta sekä taipumaan ja irtomaan tulostusalueesta. Tulosteen päälle voidaan puhalttaa kohdistetusti ilmaa tulostuspäähän kiinnitetystä tuulettimesta, jotta kuuma suklaa saadaan nopeammin asettumaan. Havainnot jäähdytyksestä perustuvat pitkälti omaan käytännön kokemukseeni aiheesta sekä havaintoihini kaupallisista 3D-suklaatulostimista.

3D-suklaatulostimen kinemaattiseksi rakenteeksi on useita eri vaihtoehtoja. Rinnakkainen Delta-rakenne, missä liikutellaan tulostusalueen tulostuspään sijasta, tarjoaa mahdollisuuden rakentaa tulostuspää kiinteäksi osaksi 3D-tulostimen runkoa. Tämä mahdollistaa ison suklaasäiliön liittämiseen tulostuspään yhteyteen sekä muutenkin vapaamman tulostuspään suunnittelun. Etenkin tällä rakenteella suuttimen etäisyys tulostuspinnasta kannattaa kalibroida ja säätää automaattisesti anturin avulla, koska tulostuskorkeus on tärkeä parametri 3D-tulostuksessa, ja Delta-rakenteisia tulostimia on muuten työlästä kalibroida. Osat, jotka ovat kontaktissa suklaan kanssa, kannattaa rakentaa elintarvikekelppoisista materiaaleista, joita käsiteltiin alaluvussa 3.7. Hyviä vaihtoehtoja ovat esimerkiksi ruostumaton teräs sekä POM C-muovi.

Tulostuspään konseptin sekä muiden havaintojen esittely päättää tämän työn. Kaiken kaikkiaan työ oli varsin pitkä kirjoitusprojekti ja aihe täsmentyi vasta kirjoittaessa, kun aloin tutkia eri tulostuspäitä sekä patenteja. Olen kuitenkin varsin tyytyväinen lopputulokseen, vaikka työn olisi voinut ehkä rajata paremmin. Työ sisältää jonkin verran omaa kokemukseeni nojautuvia arvauksia, mutta olen pyrkinyt mainitsemaan asian aina kirjoittaessa. Työstä saa käsityksen suklaasta 3D-tulostusmateriaalina sekä hyvät pohjatiedot suklaata sekä myös muita ruoka-aineita tulostavan tulostuspään ja 3D-tulostimen suunnitteluun.

LÄHTEET

3D Printers Online Store, MMUSE - NEW TOUCHSCREEN CHOCOLATE 3D PRINTER, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 6.11.2018): <https://www.3dprintersonlinestore.com/mmuse-touch-screen-chocolate-3d-printer>

3ders, (2014), South Africa's 3D printed chocolate factory, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 3.11.2018): <https://www.3ders.org/articles/20140102-south-africas-3d-printed-chocolate-factory.html>

Alper, ULTRA-FLAT HEATING ELEMENT - KAPTON HEATERS - ETCHED FOIL, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): <https://www.alper.it/prodotti/scheda.asp?ID=4&lang=en>

Asetus 1935/2004, (2004), Euroopan parlamentti ja Euroopan Unionin neuvosto. Saatavissa (viitattu: 8.11.2018): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004R1935&from=FI>

Asetus 2023/2006, (2006), Euroopan yhteisöjen komissio. Saatavissa (viitattu: 8.11.2018): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R2023&from=FI>

Asetus 10/2011, (2011), Euroopan komissio. Saatavissa (viitattu: 8.11.2018): <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:012:0001:0089:FI:PDF>

S. T. Beckett, M. Aebi, U. Löser, M. S. Fowler, Ch. Krüger, S. J. Haylock, T. M. Dodds, M. A. Wells, H. J. Kamphuis, G. R. Ziegler, R. Hogg, G. Ziegler, J. H. Walker, G. Talbot, E.J. Windhab, M.P. Gray, E. Minson, E.G. Wohlmuth, F. Burndred, C.E. Jones, A. Martinez-Inchausti, P.J. Couzens, J.P. Lambert, M.J Webber, (2009), Industrial Chocolate Manufacture and Use, Blackwell Publishing Ltd., toimittanut S. T. Beckett, 720 p.

S. Buhr, (2015), Hershey's Chocolate 3D Printer Whips Up Any Sweet Design You Want, TechCrunch, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): <https://techcrunch.com/2015/09/16/likeachocolateselfie/?guccounter=1>

D. L. Cederberg, M. Christiansen, S. Ekroth, J. Engman, B. Fabech, K. Guðjónsdóttir, J. T. Håland, J. Ingibjörg, P. Kostamo, C. Legind, B. Mikkelsen, G. Ólafsson, K. Svensson, (2015), Food contact materials – metals and alloys, TemaNord, ISSN 0908-6692 ; 2015:522, 63 p. Saatavissa (viitattu 18.9.2018): <http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:816816/FULLTEXT02.pdf>

L. Chang, (2016), Design, print, devour: Xoco lets you 3D print your dreams in solid chocolate, Digital Trends, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 17.9.2018): <https://www.digitaltrends.com/home/xoco-3d-print-chocolate/#:FyxwKyCV37EOvA>

Choc Edge, 3D Chocolate Printing Guide, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 10. huhtikuuta 2018): <http://chocedge.com/faq.html>

Chocovision, (2018), Revolution 2, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 2.11.2018): <http://www.chocovision.com/index.php/revolution-2.html>

Direktiivi 2000/36/EY, (2000), Euroopan parlamentti ja Euroopan Unionin neuvosto. Saatavissa (viitattu 8.11.2018): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0036&from=EN>

E3D-Online.com, Heater Cartridge - 12v 40w, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): <https://e3d-online.com/heater-cartridge-12v-40w>

Evira, (2018), Kontaktimateriaalien turvallisuus ja muu vaatimustenmukaisuus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 20.9.2018): <https://www.evira.fi/elintarvikkeet/valmistus-jamyynti/kontaktimateriaalit/mista-kontaktimateriaalien-turvallisuus-ja-muu-vaatimustenmukaisuus-muodostuu/>

Farnell, MCTE1-19913L-S. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): <https://uk.farnell.com/multicomp/mcte1-19913l-s/peltier-cooler-200w/dp/1639732>

I. Festeu, (2011), Paste Extruder Stepper Motor Printing Head. Saatavissa (viitattu 5.11.2018), verkkosivu: <https://www.thingiverse.com/thing:6756>

Fine Chocolate Industry Association, Fine chocolate glossary. verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 10. 4.2018): <https://www.finechocolateindustry.org/chocolate-glossary>

I. Foubert, K. Dewettinck, D. Van de Walle, A.J. Dijkstra, P.J. Quinn, (2007), The Lipid Handbook, Taylor & Francis Group, toimittanut F. D. Gunstone, J. L. Harwood, ja A. J. Dijkstra. 3.painos, luku 7, 471-534 pp.

Fouche 3d Printing, (2015), Chocolate factory, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 3.11.2018): <http://www.fouche3dprinting.com/single-post/2015/11/25/Chocolate-factory>

GIUNTI al Punto, Finest Belgian Dark Chocolate (Callets) 2,5kg, verkkosivu. Saatavissa: (viitattu: 28.10.2018): <https://www.giuntialpunto.it/product/b079yqr12v/alimentari-e-cura-della-persona-callebaut-n°-811-545-copertura-di-cioccolato>

F. C. Godoi, S. Prakash, B. R. Bhandari, (2016), 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects, *Journal of Food Engineering*, Elsevier Ltd., Vol. 179, 44–54 pp.

Grand View Research, (2018), *Chocolate Confectionery Market Size , Share & Trends Analysis Report By Product (Boxed , Countlines , Molded Bars , Seasonal Chocolates , Straightlines , Others), By Type (Milk , Dark , White), by Region And Segment Forecasts, 2018 - 2025*, Report ID: GVR-2-68038-294-5, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 1.4.2018): <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/chocolate-confectionery-market>

L. Hao, S. Mellor, O. Seaman, J. Henderson, N. Sewell, M. Sloan, (2010), *Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing*, *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, Vol.5, No.2, 57–64 pp.

R. Hilfiker, (2013), *Polymorphism of Crystalline Systems, Crystallization: Basic Concepts and Industrial Applications*, John Wiley & Sons, luku 5, 85–103 pp.

Hydraulics & Pneumatics, (2012), *Engineering Essentials: Fundamentals of Hydraulic Pumps*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4. marraskuuta 2018): <https://www.hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicPumpsM/Article/False/6401/TechZone-HydraulicPumpsM>

F. Jia, X. Wang, N. Mustafee, L. Hao, (2016), *Investigating the feasibility of supply chain-centric business models in 3D chocolate printing: A simulation study*, *Technological Forecasting and Social Change*. Elsevier Science Ltd, Vol. 102, 202–213 pp.

B. Landoni, (2014), *3Drag is now printing with Chocolate!*, Open Electronics, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.11.2018): <https://www.open-electronics.org/3drag-is-now-printing-with-chocolate/>

B. Landoni, (2015), *The 3DRAG CHOCO (Chocolate 3d printer) Cooling system explained*, Open Electronics, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 6.11.2018): <https://www.open-electronics.org/the-3drag-choco-chocolate-3d-printer-cooling-system-explained/>

K. Lehtinen, (2018), *Suomenkielinen sanasto, FIRPA*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 10.2.2018): <http://www.firpa.fi/html/sanasto.html>

Z. Liu, M. Zhang, B. Bhandari, Y. Wang, (2017), *3D printing: Printing precision and application in food sector*, *Trends in Food Science & Technology*. Elsevier Ltd., Vol.69, 83–94 pp.

A. Locker, (2017), 12 Vital Facts About Food Safe 3D Printing, All3DP, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 28.9.2018): <https://all3dp.com/1/food-safe-3d-printing-abs-pla-food-safe-filament/>

K. van Malssen, R. Peschar, C. Brito, H. Schenk, (1996), Real-time X-ray powder diffraction investigations on cocoa butter. III. Direct β -crystallization of cocoa butter: Occurrence of a memory effect, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol.73, No.10, 1225–1230 pp.

D. A. Mantell, A. W. Hays, Z. C. Langford, (2014), Printing 3d tempered chocolate, Xerox Corp., Pat. Google Patents US20140120229A1. Saatavissa (viitattu 7.11.2018): <http://www.google.com/patents/US20140120229>.

S. Mantihal, S. Prakash, F. C. Godoi, B. Bhandari, (2017), Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Elsevier Ltd., Vol. 44, Issue (December 2016), 21–29 pp.

Manufacturing Chemist, (2012), Peristaltic pumps – advantages and applications, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): https://www.manufacturingchemist.com/news/article_page/Peristaltic_pumps__advantages_and_applications/74693

Meerstetter Engineering, (2017), Peltier Element Efficiency, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): <https://www.meerstetter.ch/compendium/peltier-element-efficiency#DC%20VS%20PWM>

M. Mensley, (2018), 2018 3D Printer Extruder Guide – All You Need to Know, All3DP, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 26.9.2018): <https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/>

Miam Factory, 3D PRINTING OF CHOCOLATE, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 3.11. 2018): <http://www.miamfactory.com/en/3d-printing/>

Michiel Cornelissen Ontwerp, (2016), XOCO chocolate printer, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 17.9.2018): http://www.michielscornelissen.com/portfolio_page/xoco-chocolate-printer/

Nesbitt, B. (2006) Pump types, *Handbook of Pumps and Pumping*, Elsevier Science Ltd., luku 1, s. 1–54 pp.

E. Notter, (2011), *The Art of the Chocolatier: From Classic Confections to Sensational Showpieces*, John Wiley & Sons, 407 p.

NTDTV, (2017), High-tech Easter treats—3D-printed in Belgium, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 3.11.2018): <https://www.youtube.com/watch?v=Y0h7QyyQ4gw>

Porimy, 3D food printer, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 6.11.2018): <http://www.porimy.com/product.asp?Plt=370>.

Rich, (2015), DeltaBots launches 3D PotterBot Clay 3D printer with constant flow RAM extruder, 3ders, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): <https://www.3ders.org/articles/20150209-deltabots-launches-3d-potterbot-clay-3d-printer-with-constant-flow-ram-extruder.html>.

K. F. Schmid, (2013), Concise Encyclopedia of Construction Terms and Phrases, Momentum Press, p. 700.

K. W. Smith, K. van Malssen, (2002), Cocoa Butter Crystallisation, Unilever R&D Colworth. Saatavissa (viitattu 8.11.2018): <http://studylib.net/doc/9627592/cocoa-butter-crystallisation-kevin-w.-smith-and-kees-van-ma...>

N. Sözer, (2017), 3D food printing: A Disruptive Food Manufacturing Technology, 3D Food Printing Conference, Saatavissa (viitattu 8.11.2018): https://3dfoodprintingconference.com/wp-content/uploads/2017/07/Nesli-Sozer-3D-Food-Printing-Conference_Sozer28062017.pdf

Structur3D Printing, (2016), ULTIMAKER AND THE DISCOV3RY PASTE EXTRUDER, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 4.11.2018): <https://www.structur3d.io/dis-cov3ry-complete/>

J. Stryczek, S. Bednarczyk, K. Biernacki, (2014), Gerotor pump with POM gears: Design, production technology, research, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol.14, No.3, 391–397 pp.

J. Sun, W. Zhou, D. Huang, J. Y. H. Fuh, G. S. Hong, (2015), An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication, Food and Bioprocess Technology, Springer US, Vol.8, No.8, 1605–1615 pp.

G. Talbot, S. T. Beckett, P. Yates, J. Birkett, W. P. B. Edwards, M. Brown, D. J. Cebula, A. Hoddle, G. Ziegler, P. J. Subramaniam, M. Wells, K. Groves, K. Smith, K. Richter, M. J. Bean, G. Geschwindner, H. Drouven, J. Meyer, (2009), Science and Technology of Enrobed and Filled Chocolate, Confectionery and Bakery Products, Woodhead Publishing Limited, toimittanut G. Talbot, 453 pp.

G. Tannenbaum, (2004), Chocolate: A Marvelous Natural Product of Chemistry, Journal of Chemical Education, Vol. 81, Issue 8, 1131 p.

Trinamic, (2016), StallGuardTM, verkkosivu (viitattu: 15.9.2018). Saatavissa: <https://www.trinamic.com/technology/adv-technologies/stallguard/>

D. Verbruggen, (2014), The road to better paste extrusion, RepRap magazine, No.3, 26–40 pp. Saatavissa (viitattu: 16.3.2018): https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3

Vink Finland Oy, (2016a), Tekniset tiedot PMMA, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 28.9.2018): http://landing.vink.fi/?utm_source=vink-mainpage&utm_medium=banner&utm_campaign=download

Vink Finland Oy, (2016b), Tekniset tiedot POM, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 28. syyskuuta 2018): http://landing.vink.fi/?utm_source=vink-mainpage&utm_medium=banner&utm_campaign=download

M. Virtanen, A. Kaiponen, (2018), Elintarvikkeen kanssa kosketukseen joutuvia materiaaleja ja tarvikkeita koskeva valvontaohje, Evira, Ohje / versio 17018/4 s. 24. Saatavissa (viitattu 8.11.2018): https://www.evira.fi/globalassets/tietoa-evirasta/lomakkeet-ja-ohjeet/elintarvikkeet/kontaktimateriaalit/eviran_ohje_17018_lop_6_fi.pdf

Y. Wang, T. Chen, X. Wang, W. Hu, Y. Zhao, H. Yin, (2017), 3D Food Printer, Kunshan Porimy 3D Printing Technology Co., Pat. US 2017/0295816 A1. Saatavissa (viitattu 8.11.2018): www.freepatentsonline.com/y2017/0295816.html

R. L. Wille, E. S. Lutton, (1966), Polymorphism of cocoa butter, Journal of the American Oil Chemists Society, Vol.43, No.8, 491–496 pp.

B. Wolf, (2011), Rheological properties of chocolate, New Food magazine, No.2 2011. Saatavissa (viitattu: 16.3.2018): <https://www.newfoodmagazine.com/article/4459/rheological-properties-of-chocolate/>

A. Zimmerman, D. F. Walczyk, S. S. Crump, J. S. Batchelder, (2012), Additive manufacturing system and method for printing customized chocolate confections, Stratasys, Inc., Pat. Google Patents US 2012/025 1688 A1. Saatavissa (viitattu 8.11.2018): <http://www.google.com/patents/US20120251688>